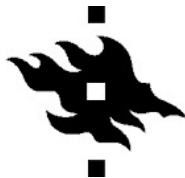




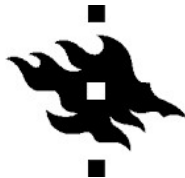
HELSINGIN YLIOPISTO
MAATALOUS-METSÄTIEEELLINEN TIEDEKUNTA

Hakkuutähteiden vaikutus kasvi- huonekaasupäästöihin ojitetulla suolla Etelä-Suomessa

Helinä Poutamo
Pro-gradu -tutkielma
Metsien ekologia ja käyttö
Metsätieteiden laitos
Helsingin yliopisto
Syyskuu 2019



Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Maatalous- metsätieteellinen tiedekunta		Laitos/Institution– Department Metsätieteiden laitos
Tekijä/Författare – Author Helinä Poutamo		
Työn nimi / Arbetets titel – Title Hakkuutähteiden vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin ojitetulla suolla Etelä-Suomessa		
Oppiaine / Läroämne – Subject Metsien ekologia ja käyttö / metsä- ja suoekosysteemien hoito ja ennallistaminen		
Työn laji/Arbetets art – Level Pro gradu -tutkielma	Aika/Datum – Month and year Syyskuu 2019	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 51
Tiivistelmä/Referat – Abstract <p>Suot ovat merkittäviä hiilen ja typen varastoja. Ojitettujen soiden metaanipäästöt ovat alhaisemmat kuin luonnontilaisten, mutta turpeen typpioksiduuli- ja hiilidioksidipäästöt lisääntyvät ojituksen jälkeen. Ravinteikkailla soilla ojituksen vaikutus turpeen kasvihuonekaasupäästöihin on suurempi kuin vähäravinteisilla soilla. Ojitetun suon kasvava kasvillisuus ja puusto muodostuvat suureksi hiilinieluksi. Metsäojituksilla on Suomessa tois- taiseksi ollut pääasiassa ilmastoa viilentävä vaikutus.</p> <p>Suomessa on metsätaloudelle ojitettuja soita noin 4,6 miljoonaa hehtaaria. Soiden metsäojitus alkoi 1900-luvun alussa ja oli kiihkeimmillään 1960–1980-luvuilla, joten turvekankaat ovat nyt nuoria tai varttuneita kasvatus- metsiä. Metsätaloudellisten toimenpiteiden vaikutuksesta ojitettujen soiden kasvihuonekaasuihin on vain vähän tutkimustietoa. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten hakkuutähteet vaikuttavat ojitetun suon hiili- dioksi-, metaani- ja typpioksiduulipäästöihin.</p> <p>Kasvihuonekaasuja mitattiin vuosien 2016–2017 ajan viidellä koealalla suljetun kammion menetelmällä Tam- melan Lettosuolla, joka on 1969-vuoden uudisojituksen jälkeen vaihtunut mustikkaturvekankaaksi. Kevättäl- vella 2016 Lettosuolla suoritettiin kuusialikasvoksen vapauttamiseen tähtäävä hakkuu, jossa poistettiin kaikki valtapuumänyt. Hakkuiden aikana metsäkone karsi puista hakkuutähteet ajourille. Jokaisella koealalla ajouralle perustettiin kaksi hakkuutähteellistä kauluskäsittelyä, ajouran viereen yksi vähätähteinen kauluskäsit- tely ja yksi hakkuutähteetön kauluskäsittely. Kasvihuonekaasujen lisäksi hakkuutähdekauluskäsittelyiltä mitat- tiin hakkuutähteiden kuivamassa, ilman lämpötila sekä pohjavedenpinta.</p> <p>Hakkuutähteiden peittämällä kauluksilla hiilidioksidipäästöt olivat 0,81–0,88 g m⁻² h⁻¹. Päästöt olivat 1,5–2-ker- taisia hakkuutähteettömiin kauluksiin verrattuna (0,40–0,54 g m⁻² h⁻¹). Kilo hakkuutähteiden kuivamassaa nosti hiilidioksidipäästöjä 0,10 ± 0,01 g m⁻² h⁻¹. Neulasmassa nosti päästöjä neljä kertaa enemmän kuin oksamassa. Koealoilla 1–4 kaulukset, jotka olivat jääneet metsäkoneen renkaan painamaan uraan, olivat ainoita metaanin lähteitä (0,0055 mg m⁻² h⁻¹). Muiden kaulusten metaanivuo vaihteli -0,0035 ja -0,0136 mg m⁻² h⁻¹ välillä. Kilo hakkuutähdemassa nosti metaanipäästöjä 0,003 ± 0,001 mg m⁻² h⁻¹. Neulasmassan vaikutus oli nelinkertainen oksamassaan verrattuna. Koeala 5 tutkittiin metaanipäästöjen osalta erikseen, sillä koealalle kasvaneet tupas- villat vaikuttivat tuloksiin merkittävästi. Kauluskäsittelyjen typpioksiduulipäästöt eivät eronneet toisistaan tilas- tollisesti merkitsevästi, vaikka hakkuutähteellisiltä kauluskäsittelyiltä (0,20–0,30 mg m⁻² h⁻¹) mitattiinkin kaksin- tai kolminkertaisia päästöjä hakkuutähteettömiin kauluksiin (0,10 mg m⁻² h⁻¹) verrattuna.</p> <p>Hakkuutähteet ja metsäkoneen mekaaninen vaikutus turpeeseen lisäävät hiilidioksi- ja metaanipäästöjä ra- vinteikkailla ojitetuilla soilla voimakkaan harvennuksen yhteydessä. Myös typpioksiduulipäästöt lisääntyvät, mutta vuosi suuri satunnaisvaihtelu ja pieni otanta tekivät tuloksesta tilastollisesti merkityksettömän tässä tut- kimuksessa.</p>		
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Hakkuutähteet, kasvihuonekaasupäästöt, hiilidioksidi, metaani, typpioksiduuli, ojitettu suo		
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helsingin yliopiston kirjasto – Helda / E-thesis (opinnäytteet) ethesis.helsinki.fi		
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information Ohjaajat: yliopistonlehtori Kari Minkkinen (HY) ja tutkija Paavo Ojanen (HY)		



Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos/Institution– Department Department of Forest Sciences
Tekijä/Författare – Author Helinä Poutamo		
Työn nimi / Arbetets titel – Title The effect of logging residues on greenhouse gas fluxes on a forestry-drained peatland in Southern Finland		
Oppiaine /Läroämne – Subject Forest ecology and management / Management and restoration of forest and peatland ecosystems		
Työn laji/Arbetets art – Level Master's thesis	Aika/Datum – Month and year September 2019	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 51
<p>Tiivistelmä/Referat – Abstract</p> <p>Peatlands are significant pools of carbon and nitrogen. Forestry-drained peatlands have lower methane emissions than undisturbed peatlands, but emissions of carbon dioxide and nitrous oxide increase after ditching. The effect of ditching on the emissions of peat is stronger on nutrient-rich peatlands than on nutrient-poor peatlands. However, the growing vegetation and wood production form a large carbon sink. So far, forestry-drained peatlands have mainly been carbon sinks in Finland.</p> <p>There are 4.6 million hectares of forestry-drained peatlands in Finland. Ditching peatlands for forestry started in the beginning of the 20th century, and was on its height from 1960s to 1980s. Forestry-drained peatlands are reaching maturity now, but there is little knowledge about the effect of forest management practices on greenhouse gas emissions from forestry-drained peatlands. The purpose of this study is to investigate the effect of logging residues on emissions of carbon dioxide, methane and nitrous oxide from forestry-drained peatlands.</p> <p>Greenhouse gas emissions were measured from the nutrient-rich peatland Lettosuo in Tammela that was drained for forestry in 1969. In early spring of 2016, dominant pine trees were harvested to make room for spruce undergrowth. During the harvest, the harvester formed piles of logging residues on its tracks to avoid erosion of the soil. Five plots were established and measurements taken with the closed-chamber method during 2016-2017. On each of the five plots, two chamber collars were installed on the machine's tracks, full of logging residues, and other two collars were installed outside of the tracks with little to no logging residues. In addition to greenhouse gas emissions, the dry mass of the logging residues, temperature and groundwater level were measured.</p> <p>Carbon dioxide emissions from residue-covered collars was measured at 0.81–0.88 g m⁻² h⁻¹. The fluxes were 1.5-2 times larger than on the control collars (0.40–0.54 g m⁻² h⁻¹). A kilogram of logging residues raised the emissions by 0.10 ± 0.01 g m⁻² h⁻¹. Compared to the dry mass of branches, the dry mass of needles increased the emissions fourfold. On plots 1-4, the collars installed in the groove of the harvester's tracks were the only sources of methane by 0.0055 mg m⁻² h⁻¹. The methane flux of the other collars varied between -0.0035 and -0.0136 mg m⁻² h⁻¹. A kilogram of logging residues raised methane fluxes by 0.003 ± 0.001 mg m⁻² h⁻¹. Again, the effect of needles was quadruple as compared to branches. Plot #5 was investigated separately due to the <i>Eriophorum vaginatum</i> that had grown inside the collars. On all plots, nitrous oxide emissions didn't significantly differ from collar to collar, even though emissions measured from logging-residue covered collars (0.20–0.30 mg m⁻² h⁻¹) were two to three times larger than on the other collars (0,10 mg m⁻² h⁻¹).</p> <p>Logging residues and the mechanical impact of the harvester on the peat soil increase emissions of carbon dioxide and methane. Emissions of nitrous oxide also increase, but the variance of measured emissions and the small sample size rendered the results statistically insignificant.</p>		
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Logging residues, greenhouse gas flux, carbon dioxide, methane, nitrous oxide, forestry-drained peatland		
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helda, Viikki Science Library		
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information Supervisors: University lecturer Kari Minkkinen (UH) and researcher Paavo Ojanen (UH)		

Sisällysluettelo

Käsitteet.....	4
1 Johdanto	5
1.1. Tausta	5
1.1.1. Soiden kasvihuonekaasuvuot ja -varastot	5
1.1.2. Soiden kasvihuonekaasuvuot ojituksen jälkeen	7
1.1.3. Hakkuutähteiden vaikutus ojitettujen soiden kasvihuonekaasupäästöihin ..	9
1.2. Tavoitteet.....	12
2 Aineisto ja menetelmät	13
2.1. Aineiston hankinta.....	13
2.1.1. Koealue	13
2.1.2. Mittauspisteet	14
2.1.3. Kaasujen mittaus	16
2.1.4. Muut mittaukset	16
2.2. Aineiston laskenta ja analyysi	18
2.2.1. Kasvihuonekaasujen vuot	18
2.2.2. Aineiston tilastollinen käsittely.....	22
3 Tulokset	23
3.1. Hakkuutähteiden massat ja jakaumat	23
3.2. Vuomittausten määrä ja jakaumat sekä ympäristömuuttujat.....	24
3.3. Hakkuutähteiden vaikutus hiilidioksidivuohon.....	28
3.4. Hakkuutähteiden vaikutus metaanivuohon.....	29
3.5. Hakkuutähteiden vaikutus typpioksiduulivuohon	31
4 Tulosten tarkastelu.....	31
4.1. Hakkuutähteiden vaikutus hiilidioksidipäästöihin	32
4.2. Hakkuutähteiden vaikutus metaanipäästöihin	33
4.3. Hakkuutähteiden vaikutus typpioksiduulipäästöihin.....	34
4.4. Tulosten luotettavuus	35
5 Johtopäätökset.....	36
Kiitokset	37
Lähteet.....	38

Käsitteet

Hiilidioksidi (CO₂): Yhden hiilen ja kahden happiatomin muodostama kaasu. Hiilidioksidia syntyy eliöiden aineenvaihdunnassa, ja sitä sitoutuu kasveihin fotosynteesissä. Hiilidioksidi on kasvihuonekaasu, jota on ilmakehässä n. 400 ppm (IPCC 2014).

Hiilidioksidiekvivalentti (CO₂-ekv.): Kasvihuonekaasupäästöjen yhteismitta, jonka avulla voidaan laskea yhteen eri kasvihuonekaasujen päästöjen lämmitysvaikutus. Päästöt yhteismitallistetaan eli muunnetaan ekvivalenttiseksi hiilidioksidiksi lämmityspotentiaalikertoimien avulla.

Metaani (CH₄): Yksinkertainen hiilivety. Metaania muodostuu orgaanisen aineen hapettomassa hajotuksessa. Sen ilmaa lämmittävä vaikutus on n. 30-kertainen hiilidioksidiin verrattuna 100 vuoden aikana. Metaania on ilmakehässä n. 1800 ppb (IPCC 2014).

Typpioksiduuli (N₂O): Typen oksidi. Typpioksiduulia syntyy, kun maaperän mikrobit ensin hapettavat nitrifikaatiossa ammoniumia kasveille käyttökelpoisiksi nitraateiksi ja nitriiteiksi, ja sitten pelkistävät ne denitrifikaatiossa typpioksiduuliksi, typpioksidiksi ja molekulaariseksi typeksi. Typpioksiduuli on 265-kertaa hiilidioksidia voimakkaampi kasvihuonekaasu 100 vuoden aikana. Sitä on ilmakehässä n. 320 ppb (IPCC 2014).

Metsäojitettu suo: Metsätaloustyöhön ojitettu suo, jolla ei ole aikaisempaa maataloudellista historiaa. Ojituksen on tarkoitus muuttaa suo turvekankaaksi.

Hakkuutähteet: Puunkorjuussa metsään jätettävät puun osat, kuten latvus, oksat, kannot ja juuristo sekä mahdollisesti aines- ja raivauspuu.

Kammiomittaus: Maaperän ja ilmakehän välillä tapahtuvan kasvihuonekaasujen vaihdon mittaamenetelmä (Alm et al. 2007). Läpinäkyvä (fotosynteesin mittaus) tai läpinäkymätön (kasvihuonekaasujen mittaus) kammio asetetaan ilmatiivisti maahan asennettuun kaukukseen, ja kaasunäytteitä kerätään joko automaattisesti tai manuaalisesti tietyin väliajoin. Kaasuvuot lasketaan kaasujen pitoisuuksien muutoksen perusteella.

1 Johdanto

1.1. Tausta

1.1.1. Soiden kasvihuonekaasuvuot ja -varastot

Ekologisen määritelmän mukaan luonnontilaiset suot ovat kostean ilmaston ylläpitämiä ekosysteemejä, joissa pohjaveden pinta on lähellä maan pintaa ja johon kertyy turvetta hitaan hapellisen hajotuksen takia (Laine ja Vasander 1998). Turve on merkittävä hiilivarasto ja hiilidioksidin nielu: maapallon maapinta-alasta vain 3 % on soita, mutta soiden turpeeseen on varastoitunut yli 30 % maailman maaperien hiilestä (Strack 2008). Boreaalisiin ja subarktisiin soihin, jotka kattavat noin 88 % maailman suopinta-alasta, on sitoutunut arvioiden mukaan 270–370 petagrammaa ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$) hiiltä (Turunen ym. 2002, Strack 2008). Nämä pohjoiset suot varastoivat hiiltä turpeeseen 66 teragrammaa ($1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$) lisää vuosittain (Turunen ym. 2002). Suomen luonnontilaisissa soissa arvioidaan olevan 2257 Tg hiiltä varastoituneena, ja ne sitovat noin 0,79 Tg hiiltä vuosittain (Turunen ym. 2002). Kun mukaan lasketaan ojitetut turvemaat, on Suomen turpeen hiilivarasto 5500 Tg, mikä on noin 9-kertainen puuston hiilivarastoon (618 Tg) verrattuna (Kauppi ym. 1997, Minkkinen ym. 2002).

Pohjaveden korkean pinnan aiheuttaman anaerobisen hajotuksen vuoksi suot ovat luontaisia metaanin lähteitä (Päivänen 2007). Maailman suot ja kosteikot päästävät 127–202 Tg metaania ilmakehään vuosittain, mikä vastaa noin 30 % maailman kaikista metaanipäästöistä (The Global Methane Budget... 2016). Pohjoisten soiden ja kosteikkojen metaanipäästöjen on arvioitu olevan 38 Tg vuodessa (Bartlett ja Harriss 1993). Typpioksiduulia syntyy enimmäkseen orgaanisen typen hajotusprosesseissa nitrifikaatiossa ja denitrifikaatiossa. Luonnontilaiset suot eivät ole merkittäviä typpioksiduulin lähteitä (esim. Regina ym. 1996, Lohila ym. 2010a). Toisaalta turve on suuri orgaanisen typen varasto: pohjoiset suot varastoivat 9–15 Pg typpeä (Limpens ym. 2006).

Maailman pohjoisista soista noin 4 % eli 15 miljoonaa hehtaaria on ojitettu metsätaloudelle (Gorham 1991, Paavilainen ja Päivänen 1995). Suomen osuus tästä pinta-alasta on 34 %, Venäjän 28 %, Ruotsin 11 %, Iso-Britannian 3,9 %, USA:n ja Kanadan yhteensä

3 % sekä Kiinan 0,5 % (Minkkinen ym. 2008). Euroopan turvemaista lähes kolmasosa sijaitsee Suomessa (Montanarella ym. 2006), jossa alkuperäinen suopinta-ala ennen metsäojituksia on ollut noin 10 miljoonaa hehtaaria (Metsätilastollinen vuosikirja 2014). Nykyään Suomessa ojitettuja soita on 4,6 miljoonaa hehtaaria ja ojittamattomia soita 4,1 miljoonaa hehtaaria (Metsätilastollinen vuosikirja 2014). Metsätaloudelle ojituksen lisäksi 63 000 ha soista on otettu turpeennostoalueiksi tai noston jälkeen poistettu käytöstä, 60 000 ha muutettu tekojärviksi, ja 35 000 ha on tieverkoston alla (Turunen 2008). Maatalouden käytössä on arvioitu olevan 256 000 hehtaaria suopeltoja (Kekkonen ym. 2019). Soiden metsäoitus alkoi 1900-luvun alussa ja oli kiihkeimmillään 1960–1980-luvuilla (Päivänen 2007). Vuosien 1950–2000 välillä Suomen soiden ja turvemaiden hiilivaraston on arvioitu lisääntyneen 52 Tg lähinnä ojituksen aiheuttaman puuston kasvun ansiosta (Turunen 2008). Samalla turpeeseen sitoutunut hiili on kuitenkin vähentynyt 73 Tg (Turunen 2008).

Suomi on sitoutunut Kioton ilmastopöytäkirjaan, jonka myötä sillä on velvollisuus raportoida mm. maankäytön, maankäytön muutoksen ja metsätalouden (englanninkielisen nimen mukaan LULUCF) kasvihuonekaasupäästöistään YK:n ilmastomuutoskonventille sekä EU:lle (UNFCCC 1997). LULUCF-sektori on Suomessa merkittävä kasvihuonepäästöjen nielu: vuonna 2017 sektorin nettonielu oli 20,4 miljoonaa hiilidioksidiekvivalenttitonnia, josta metsämaan nielu oli 27 milj. CO₂-ekv. tonnia (Suomen virallinen tilasto... 2019). Metsätaloudelle ojitettujen turvemaiden maaperä oli kuitenkin hiilidioksidin, metaanin ja typpioksiduulin lähde 7,1 miljoonalla CO₂-ekv. tonnilla (Suomen virallinen tilasto... 2019). Suomen metsätalousmaista, ml. kitu- ja joutomaat, 18 % on ojitettuja soita (Metsätilastollinen vuosikirja 2014), joten ne luovat suhteellisesti suuren osan metsätalouden päästöistä. Luonnonvaraisten soiden uudisoitus metsätaloudelle on enää hyvin vähäistä (Päivänen 2007). Ojitettujen soiden ojaverkoston kunnostaminen ja muut metsätaloudelliset toimenpiteet voivat kuitenkin muuttaa näiden alueiden kasvihuonekaasupäästöjä (Minkkinen ym. 2008). Jatkovaa kasvatusta on ehdotettu ojitetuille soille niin kustannus- kuin ympäristönsäästösyistä (Nieminen ym. 2018).

1.1.2. Soiden kasvihuonekaasuvuot ojituksen jälkeen

Ojitus muuttaa suon veden ja ravinteiden kiertoa. Soiden uudisojituksen tarkoituksena on ohjata ympäröiviltä kivennäismailta tuleva ja suolle satava vesi ojiin ja näin laskea suon pohjaveden pintaa. Turpeen pohjavedenpinnan yläpuolisen, hapellisen pintakerroksen eli akrotelman tilavuus kasvaa, jolloin hapellinen hajotus turpeessa lisääntyy. Vesi ei enää kannattele turpeen pintakerrosta, joten se tiivistyy (Minkkinen ja Laine 1998a). Turpeen nopeamman hajotuksen ja tiivistymisen myötä kasvien käyttöön vapautuu enemmän hiiltä ja ravinteita, jolloin suokasvillisuus alkaa vaihettua metsäkasvillisuutta kohti (esim. Starr 1982, Silvola 1988). Alkuperäisen suon ravinnekoostumus määrää kasvillisuuden kehittymistä, kun korkea vedenpinta ei enää rajoita puuston kasvua (Laine ja Vanha-Majamaa 1992). Jos ojitus on onnistunut, kasvavan puuston aktiivinen veden haihduttaminen pitää pohjavedenpinnan alhaisena (Minkkinen ym. 2008). Lisääntynyt tuore karike syöttää turpeeseen uudenlaista materiaalia ylläpitäen suon vaihettumista turvekankaaksi (Laiho ym. 2003).

Ojituksen myötä tilavuudeltaan suurentunut akrotelma lisää maaperän hapellista hajotusta, jolloin hiilidioksidipäästöt nousevat (Martikainen ym. 1995, Silvola ym. 1996). Maaperän hiilidioksidipäästöjä kiihdyttävät turpeen hajotuksen lisäksi puiden ja pensaiden kasvun seurauksena lisääntynyt juuriston hengitys sekä lisääntynyt karikkeen tuotto ja hajotus (Silvola ym. 1996, Minkkinen ym. 2007a). Niukkaravinteisilla soilla maaperän hajotustoiminnot ovat niin hitaita, että juuristoon, karikkeeseen ja kasvavaan sammalakerrokseen varastoituu enemmän hiiltä kuin sitä poistuu niiden hajotuksessa (Minkkinen ja Laine 1998b, Minkkinen ym. 1999, Ojanen ym. 2013). Runsasravinteisilla soilla turpeen hiilivarastot hupenevat (Minkkinen ja Laine 1998b, Minkkinen ym. 1999, Ojanen ym. 2013). Turpeen päällä kasvibiomassan lisääntynyt kasvu kuitenkin hyvittää mahdolliset turpeen kasvaneet hiilidioksidipäästöt (Laiho 1996, Laiho ja Laine 1997, Minkkinen 2002, Ojanen 2013). Onnistuneesti metsäojitetut suot ovatkin hiilidioksidin nieluja ainakin ensimmäisen puusukupolven ajan (Minkkinen ym. 2002, Turunen 2008, Lohila ym. 2011, Ojanen ym. 2013). Kun puusto hakataan, sen hiiltä sitovat fotosynteesiprosessit lakkaavat

heti ja puumateriaaliin sitoutunutta hiiltä alkaa vapautua takaisin ilmakehään. Pitkällä tähtäimellä ojitettu suoekosysteemi voi olla hiilinielu ainoastaan, jos turvetta ei häviä.

Pohjavedenpinnan laskiessa turpeen hapeton pohjakerros eli katotelma painuu syvemmälle ja sen tilavuus pienenee, jolloin metaania syntyy vähemmän hapettoman hajotuksen tuloksena (Svensson ja Sundh 1992). Samalla metaanin kulkeutuminen hapellisen kerroksen läpi pitkittyy, jolloin akrotelmassa olevat metaanin hapettajabakteerit pystyvät hapettamaan enemmän metaania hiilidioksidiksi. Runsasravinteisilla soilla, missä pohjavesi on usein lähellä maan pintaa, metaanipäästöt vaihtelevat alle yhdestä yli 40 grammaan neliömetriltä vuodessa, kun taas niukkaravinteisilla, kuivemmilla soilla vastaavat luvut ovat alle yhdestä 16 grammaan neliömetriltä vuodessa (Moore ja Knowles 1990, Saarnio ym. 2007). Kasvillisuudella on myös suuri vaikutus soiden metaanipäästöihin (esim. Bubier 1995, King ym. 1998, Kettunen 2003). Soilla syväjuuriset kasvit kasvattavat juuribiomassaa katotelmaan, mikä lisää hajotettavan aineksen määrää katotelmassa ja siten metaanin tuotantoa (Shannon yms. 1996, Ström ym. 2003). Lisäksi tietyt suokasvit kuljettavat tuuletussolukoissaan metaania suoraan katotelmasta ilmakehään, jolloin metaani välttyy hapetukselta akrotelmassa (Shannon yms. 1996). Ojituksen jälkeen suokasvillisuus alkaa vaihettua kuivuutta kestäväksi metsäkasvillisuudeksi, jolloin suokasvillisuuden metaanipäästöjä lisäävä vaikutus lakkaa (esim. Starr 1982, Silvola 1988). Ojituksen on todettu vähentävän soiden metaanipäästöjä 30–100 %, enemmän ravinteikkailla sarasoilla kuin niukkaravinteisilla rämeillä (Nykänen ym. 1998). Ravinteikkaat ja hyvin kuivaneet runsaspuustoiset ojitetut suot voivat jopa muuttua metaanin nieluiksi (Martikainen yms. 1995, Minkkinen ym. 2007b, Ojanen 2010, Lohila 2011).

Typpioksiduulia syntyy orgaanisen typen hajotusprosesseissa nitrifikaatiossa ja denitrifikaatiossa. Luonnontilaisten soiden orgaanisen typen varastot ovat suuret, mutta typpioksiduulipäästöt hyvin pienet (Martikainen ym. 1993, Regina ym. 1996). Päästöjen vähäisyys johtuu happea vaativan nitrifikaation epäaktiivisuudesta turpeessa (Regina ym. 1996), ilmakehän yleisesti pienestä typpilaskeumasta ja kasvillisuuden suuresta epäorgaanisen typen tarpeesta. Typpioksiduulin varastoitumista voi tapahtua maaperissä, joissa epäorgaanista typpeä on vähän ja kosteuspitoisuus on korkea (Chapuis-Lardy ym. 2007), kuten boreaalisilla soilla. Soiden ojittaminen lisää akrotelman nitrifikaatiokapasiteettia, mutta sitä rajoittaa turpeen matala happamuustaso eli pH. Ravinteikkaiden soiden, joiden

pH on luontaisesti korkea, ojittaminen lisää niiden typpioksiduulipäästöjä merkittävästi, kun taas alhaisen pH:n omaavien ravinneköyhien soiden päästöt eivät juuri muutu (esim. Martikainen ym. 1995, Regina ym. 1996, Augustin ym. 1998). Typpioksiduulipäästöt vaihtelevat luontaisesti pohjavedenpinnan, lämpötilan ja ilmakehän typpilaskeuman mukaan (Lohila ym. 2010a). Typpioksiduulipäästöt voivat lisääntyä turpeen hiili-typpi-suhteen madaltuessa (Klemedtsson ym. 2005), esim. lannoituksen tai hakkuutähteiden kasaaamisen myötä.

Suon ojittaminen vähentää ojitetun alueen metaanipäästöjä ja lisää typpioksiduulipäästöjä (Martikainen ym. 1995, Laine ym. 1996, Minkkinen ym. 2002). Maaperän kokonaishiilidioksidipäästöt nousevat turpeen hajotuksen kiihtyessä sekä lisääntyneen juuriston hengityksen ja karikkeen lahoamisen myötä (Martikainen ym. 1995, Silvola ym. 1996, Minkkinen ym. 2007a). Itse turpeen hiilidioksidipäästöt voivat lisääntyä tai vähentyä suon ravinteisuudesta riippuen (Minkkinen ja Laine 1998b, Minkkinen ym. 1999, Minkkinen 2002, Ojanen ym. 2013). Ojitetun suon kasvava kasvillisuus ja puusto muodostuvat suureksi hiilinieluksi (Laiho 1996, Minkkinen 2001, Minkkinen 2002, Laiho ym. 2003). Ravinteikkailla soilla ojituksen vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin on suurempi kuin vähä-ravinteisilla soilla (Martikainen ym. 1995, Laine ym. 1996, Ojanen ym. 2013). Koko Suomen kattavissa malleissa metsäojitettujen soiden hiilivaraston on laskettu kasvaneen ojituksen jälkeen ja pysyvän hiilinieluina tulevaisuudessakin (Minkkinen ym. 2002, Turunen 2008). Metsittymisen myötä ojitetun suoalueen albedo eli auringonvalon heijastuskyky heikkenee, mutta kasvihuonekaasupäästöjen väheneminen hyvittää albedon aiheuttaman ilmastoa lämmittävän vaikutuksen, paitsi pohjoisilla vähä-ravinteisilla soilla (Lohila ym. 2010b). Metsäojituksilla on siis ollut toistaiseksi pääasiassa ilmastoa viilentävä vaikutus.

1.1.3. Hakkuutähteiden vaikutus ojitetujen soiden kasvihuonekaasupäästöihin

Suurin osa Suomen soista ojitettiin 1960–80-luvuilla, ja ne ovat pääosin nuorta tai varttunutta kasvatusmetsää. Vasta pieni osa on saavuttanut päätehakkuuiän. Turvekankailla tehdään yleensä 1–2 harvennushakkuuta ja tarvittaessa ojien perkaus sekä lannoitus. Hakkuilla on selkeä vaikutus turvekankaan kasvihuonekaasujen virtoihin (Mäkiranta ym. 2010, 2012). Hakkuiden aikana hakkuualueelta poistetaan puustoa, jolloin hakkuualueen

yhteytyskapasiteetti pienenee. Vedenpinnan taso nousee, jolloin akrotelman tilavuus pienenee, kun osa puustosta ei enää ime maasta vettä ja ravinteita. Turpeen lämpötila nousee puiden varjostuksen loputtua, ja auringonpaahteelle paljas pintaturve kuivuu, jolloin turpeen hiilidioksidipäästöt laskevat (Mäkiranta ym. 2010). Vaikka turpeen hajotus vähenee, koko hakkuualueen hiilidioksidipäästöt kasvavat runsaasti, sillä alueella on paljon hajoavia hakkuutähteitä ja kuollutta puunjuuristoa, eivätkä kaadetut puut enää hyvitä päästöjä yhteyttämällä (Mäkiranta 2010). Vedenpinnan nousun ja turpeen lämpenemisen on todettu vaikuttavan metaania ja typpioksiduulia tuottaviin hajotusprosesseihin, mutta Nieminen (1998) ja Huttunen ym. (2003) eivät havainneet hakkuilla olevan vaikutusta turpeen CH₄- ja N₂O-päästöihin. He eivät kuitenkaan ottaneet huomioon hakkuutähteitä, jotka lisäävät turpeen hiilidioksid- ja typpioksiduulipäästöjä merkittävästi (Mäkiranta ym. 2012).

Perinteisesti turvekankaiden hakkuiden yhteydessä hakkuutähteet on kaadettu metsäkoneen ajouralle parantamaan turpeen kantokykyä ja vähentämään koneen aiheuttamaa eroosiota. Hakkuiden jälkeen tähteet on jätetty ajouralle. Hakkuutähdekasat eristävät ja varjostavat niiden alla olevaa pintaturvetta, mikä muuttaa pintaturpeen lämpö- ja kosteusolosuhteita (Roberts ym. 2005, Ojanen ym. 2017). Hakkuutähteiden peittämässä, tasalämpöisessä ja pitkään kosteassa maaperässä hajottajaeliöstö on aktiivisempaa, mikä lisää orgaanisen aineen hajotusta ja vapauttaa enemmän ravinteita kasvillisuuden käyttöön (Roberts ym. 2005, Adamczyk ym. 2015, 2016). Hakkuutähteiden hajotessa niistä liukenee sateen mukana maaperään ravinteita (Wall 2008). Typen liukeneminen on hidasta, mutta fosfori, kalium, kalsium ja magnesium liukenevat suurelta osin jo ensimmäisen vuoden aikana (Hyvönen 2000, Palviainen ym. 2004, Wall 2008, Kaila ym. 2012). Hakkuutähteet ovat ravinteiden lisäksi tuoreen orgaanisen hiilen lähde, mikä maahan kulkeutuessaan voi kiihdyttää maassa jo olevan vanhan orgaanisen aineen hajoamista voimakkaasti (Kuzuyakov ym. 2000, Karhu ym. 2016). Nämä hakkuutähteiden fysikaaliset (varjostus ja eristys) ja biokemialliset (ravinteiden ja tuoreen hiilen liukeneminen) ominaisuudet vaikuttavat yhdessä niiden alla olevan maaperän hajotusprosesseihin ja siten turvemailla turpeen kasvihuonekaasupäästöihin (Ojanen ym. 2017).

Hakkuutähteiden vaikutusta kasvihuonekaasupäästöihin ojitetuilla soilla on tutkittu vain vähän (Mäkiranta ym. 2012, Ojanen ym. 2017). Mäkiranta ym. (2012) mittasivat

hakkuutähteiden peittämiltä mittauspisteiltä kaksinkertaisia hiilidioksidipäästöjä, ja yli kolminkertaisia typpioksiduulipäästöjä, verrattuna hakkuutähteettömiin mittauspisteisiin. Tähteillä ei ollut vaikutusta metaanipäästöihin. Tutkimuksen mukaan hakkuutähteet ovat kiihdyttäneet niiden alla olevan maan orgaanisen aineen hajoamisprosesseja, sillä hiilidioksidipäästöt hakkuutähteiden peittämiltä pisteiltä olivat suuremmat kuin mitattu hakkuutähdemassan lahoaminen. Ojanen ym. (2017) kuitenkin kritisoivat, että tutkimus ei ottanut huomioon hakkuutähdekasojen fysikaalisia ja biokemiallisia ominaisuuksia, joten niiden vaikutuksia maaperän hajoamisprosesseihin ei voi arvioida. Jos maaperän kiihtyneet päästöt johtuvat hakkuutähteiden fysikaalisista ominaisuuksista, voidaan päästöjä lieventää levittämällä tähteet tasaisesti hakkuualueelle kasaamisen sijaan. Jos päästöt lisääntyvät hakkuutähteiden biokemiallisten ominaisuuksien tai yhteisvaikutuksen takia, kuten Ojanen ym. (2017) esittää, on vaihtoehtona kerätä hakkuutähteet pois hakkuualueelta päästöjen vähentämiseksi.

Hakkuutähteitä on 2000-luvun aikana kerätty kasvavassa määrin bioenergiaksi korvaamaan fossiilisia polttoaineita, joskin kulutus on vähentynyt vuodesta 2013 (Helmisaari 2014, Puun energiakäyttö 2017). Vuonna 2017 suomalaiset käyttivät 7,2 milj. m³ metsähaketta energiaksi, josta 31 % (2,3 milj. m³) oli hakkuutähteitä (Puun energiakäyttö 2017). Kansallisen metsäohjelman tavoitteena on vuoteen 2020 mennessä kasvattaa metsähakkeen vuotuista käyttöä noin 13 miljoonaan kiintokuutiometriin (Kansallinen metsästrategia... 2015). Vuodelle 2020 laskettu hakkuutähteen korjuupotentiaali on 6,6 milj. m³, jos ainespuun kertymät ja uudistushakkuupinta-alat pysyvät vuosien 2008–2012 tasolla (Anttila ym. 2014). Metsäohjelman tavoite on siis ainakin hakkuutähteiden osalta hyvin saavutettavissa.

Hakkuutähteiden keräämistä energiantuotantoon on kuitenkin kritisoitu. Tähteiden mukana poistuu ravinteita, mikä voi heikentää seuraavan puusukupolven kasvua (esim. Achat ym. 2015, Curzon ym. 2014, Holub ym. 2013, Wall ja Hytönen 2011, Wei ym. 2000). Lisäksi, metsään jätetyt hakkuutähteet varastoivat hiiltä pitkään, täydelliseen hajoamiseensa saakka, kun taas energiaksi poltettu tähdemassa vapauttaa hiilen ilmakehään heti (esim. Lindholm ym. 2011, Repo ym. 2011, Karlsson ym. 2014, Olajuyigbe ym. 2014,). Erityisesti turvekankailla turpeen sisälle jäävä puumateriaali voi varastoida hiiltä vuosikausia. Mäkipää ym. (2014) simuloivat molempia hakkuutähteiden energianpolton

ilmastovaikutuksia, ja totesivat tähteiden polttamisella olevan suuremmat hiilipäästöt kuin dieselin polttamisella. Hakkuutähteiden päästöanalyysseissa usein oletetaan, että tähteiden luonnollisella hajoamisella on yhtä suuret hiilidioksidipäästöt kuin niiden polttamisella (esim. Kirkinen ym. 2008, Repo ym. 2011, Gustavsson ym. 2015). Hakkuutähteiden vaikutuksia niiden alla olevan maaperän kasvihuonekaasupäästöihin ei analyysseissa useinkaan ole otettu huomioon, eikä siitä myöskään tiedetä paljoa.

1.2. Tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää miten hakkuutähteet vaikuttavat ojitetun suon kasvihuonekaasupäästöihin. Tutkimuksessa tarkasteltavat kasvihuonekaasut ovat hiilidioksidi (CO_2), metaani (CH_4) ja typpioksiduuli (N_2O). Hakkuutähteiden fysikaaliset ja biokemialliset ominaisuudet vaikuttavat niiden alla olevan turpeen hajotusprosesseihin, mutta vaikutusten laatua on tutkittu vain vähän.

Työn keskeiset tutkimuskysymykset ovat:

1. Miten hakkuutähteet vaikuttavat ojitetun suon hiilidioksidipäästöihin?
2. Miten hakkuutähteet vaikuttavat ojitetun suon typpioksiduulipäästöihin?
3. Miten hakkuutähteet vaikuttavat ojitetun suon metaanipäästöihin?

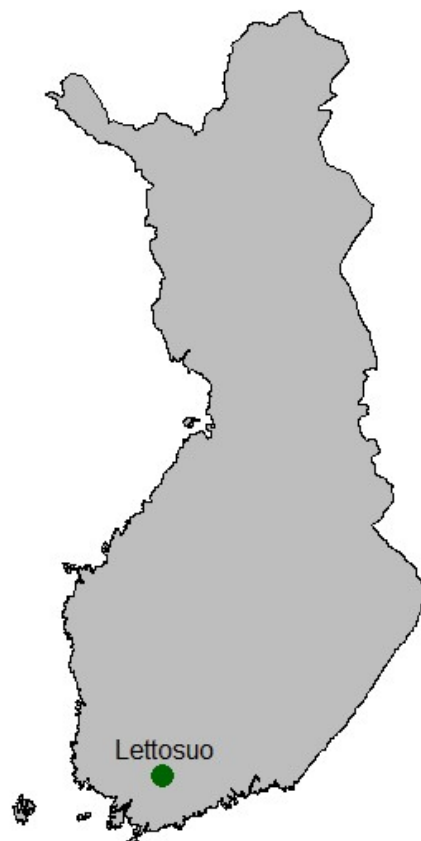
Tutkimuskysymyksistä voidaan johtaa seuraavat postulaatit:

1. Hiilidioksidipäästöt lisääntyvät suuren hakkuutähdemassan hajoamisen takia.
2. Typpioksiduulipäästöt lisääntyvät hakkuutähteistä liukenevien ravinteiden takia.
3. Metaanipäästöt eivät lisäännä eivätkä vähene hakkuutähteiden vaikutuksesta.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1. Aineiston hankinta

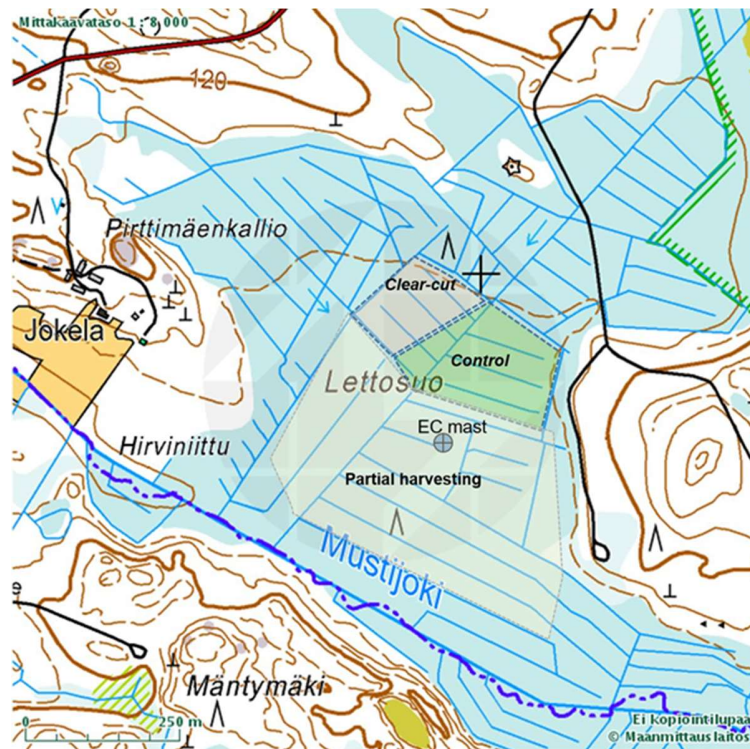
2.1.1. Koalue



Kuva 1: Lettosuo kartalla.

Aineisto on kerätty Tammelan Lettosuolta, joka sijaitsee Liesjärven kansallispuiston kuppessa Kanta-Hämeessä (kuva 1). Lettosuo ($60^{\circ}643'N$, $23^{\circ}957'E$) on alun perin ollut pääosin ruohoinen sararäme, joka on uudisojituksen jälkeen vaihettunut mustikkaturvekan-
kaaksi. Lettosuon nykyiset ojat on kaivettu vuonna 1969, mutta viitteitä 1930-luvulla kai-
vetuista ojista on löytynyt vanhoista kartoista. Lettosuolla kasvoi ennen vuoden 2016 hak-
kuita mäntyä ja hieskoivua valtapuina sekä kuusta alikasvoksena. Kevättalvella 2016 Let-
tosuolla suoritettiin kuusialikasvoksen vapauttamiseen tähtäävä hakkuu, jossa poistettiin

kaikki valtapuumännyt (75% puuston biomassasta). Samalla tehtiin myös pienialainen avohakkuu ja jätettiin hakkaamaton kontrollialue (kuva 2). Hakkuiden aikana metsäkone karsi puista hakkuutähteet ajourille turvemaahan kohdistuvan eroosion ehkäisemiseksi ja hakkuukoneen liikkumisen sujuvoittamiseksi.



Kuva 2: Kartta Lettosuosta. Kartassa näkyy avohakkuualue (clear-cut), eri-ikäishakkuualue (partial harvesting) ja kontrollialue (control). Pro-gradun aineisto on kerätty viideltä koealalta eri-ikäishakkuualueelta 60 metrin säteellä Eddy Covariance -tornista (EC-mast). Kartta: Maanmittauslaitos.

2.1.2. Mittauspisteet

Lettosuo kuuluu ICOS-mittausverkostoon ja siellä on tehty kasvihuonekaasumittauksia mm. kovarianssimenetelmällä (EC, eddy covariance) puuston yläpuolelle ulottuvasta tornista vuodesta 2009 lähtien. Toukokuussa 2016 valittiin EC-tornin läheisyydestä viisi koealaa, ja jokaiseen koealaan neljä mittauspistettä eli hakkuutähdetähtäjäkäsittelyä. Käsittelyjen sijainnit koealueella valittiin edustamaan monipuolista hakkuutähtäjäkäsittelyjen koko- ja lajijakaumaa, kuitenkin koealuetta edustavasti. Kunkin koealueen ensimmäinen

kaulus oli aina metsäkoneen ajouran keskellä renkaiden painamien urien välissä, toinen renkaan painamassa urassa, kolmas ajouran vierellä ja neljäs uran ulkopuolella (Kuva 3 3). Mittauspisteet nimettiin kahdella numerolla niin, että ensimmäinen numero viittasi koealaan ja toinen kauluksen sijaintiin koealalla. Esimerkiksi mittauspiste 23 oli koealan 2 kaulus 3, eli se sijaitsi ajouran vierellä. Kolmannen mittauspisteen vähäinen hakkuutähdemäärä edusti tyypillistä hakkuiden jälkeistä tilannetta ajouran ulkopuolella. Neljäs piste oli täysin hakkuutähteetön, ns. kontrollipiste. Mittauspisteisiin asennettiin pysyvät kaasunmittauskaulukset (kuva 3) sahaamalla kauluksen mittaiset, n. 15 cm syvät urat moottorisahalla. Mittauskammion alalaitaan asennettiin kumitiiviste, joka asetettuna kaulusten leveään uraan teki kammioista ilmatiiviin mittausten ajaksi.



Kuva 3: Kuvassa näkyy koeala 1 ja sen mittauspisteet järjestyksessä oikealta vasemmalle: 11 metsäkoneen renkaiden painamien urien välissä, 12 renkaan painamassa urassa, 13 ajouran vieressä ja hakkuutähteetön 14 ajouran ulkopuolella. Kaasujen mittauskammio on asetettuna mittauspisteelle 13. Kammioon on asennettu pieni tuuletin, sen sivusta erottuu ilmanottoletku ja sen päällä on ilmatiiviisti kiinnitetty näytteenottoletku, joka on suoraan yhteydessä Lettosuon mittauskopin mittalaitteisiin. Kammion takana näkyy sininen vedenpinnan syvyyden mittari valkoisessa putkessa. Kuva: Helinä Poutamo

2.1.3. Kaasujen mittaus

Hakkuutähdekaulukäsittelyiltä mitattiin hiilidioksidi-, metaani- ja typpioksiduulivuota suljetun kammion menetelmällä (Alm ym. 2007). Kammio oli tilavuudeltaan 108 dm³, (60 cm × 60 cm × 30 cm) läpinäkymätön suorakulmainen särmiö (

Kuva 3 3). Hiilidioksidi-, metaani- ja typpioksiduulivuota mitattiin asettamalla kammio ilmatiiviisti kaulukselle noin 5 minuutin ajaksi. Kammiossa oli pienitehoinen tuuletin, joka huolehti kaasujen pitoisuuksien tasaisesta jakaantumisesta mittauksen ajan. Kammio oli liitetty Lettosuon keskellä, EC-tornin läheisyydessä, sijaitsevaan mittauskoppiin noin 60 metrin pituisella letkulla. Mittauskopissa Los Gatos Fast Flow N2O/CO Analyzer (908-0014) määrittä typpioksiduulipitoisuuksia toimintaperiaattella, jonka englanninkielinen nimi on *laser absorption spectroscopy*. Metaani- ja hiilidioksidipitoisuudet analysoi Picarro G1301, niin ikään *wave-length-scanned cavity ring-down spectroscopy*. Kaikki kaasut analysoitiin reaaliajassa. Kaasulukemia tallennettiin 4 sekunnin välein, joten yhdeltä mittaukselta saatiin noin 75 mittauspistettä. Kummatkin laitteet tallensivat kaikki mitatut arvot mittauskopin tietokoneelle, josta tiedot pystyi noutamaan myös etänä.

Mittauskopin tietokoneen näytöltä pystyi tarkistamaan kaasujen pitoisuuksien muuttumista muutaman minuutin viiveellä. Erityisesti hiilidioksidipitoisuuden muuttumattomuus, epätasainen muutos tai datan aukkoisuus kieli epäonnistuneesta mittauksesta. Jos epäonnistunut mittaus huomattiin paikan päällä, se hylättiin ja suoritettiin uudelleen. Mittausajankohdat merkittiin kauluksittain Lettosuon loki-tekstitiedostoon, jonka avulla pystyttiin myöhemmin tietokoneella erottelemaan jatkuvasta kaasupitoisuuksien datasta todellinen mittauksen kesto ja ajankohta.

Mittauksia suoritettiin toukokuusta 2016 marraskuuhun 2017. Kesäisin kaasumittauksia tehtiin noin viikon välein, keväisin ja syksyisin kuukauden välein. Helmi- ja maaliskuussa 2017 mittauksia ei tehty.

2.1.4. Muut mittaukset

Koealueiden perustamisen aikana kaulusten sisälle jääneet tuoreet hakkuutähteet punnittiin ensimmäisen mittauskauden alussa 2.5.2016. Tähteistä eroteltiin neulaselliset kuusen

ja männyn oksat sekä neulasettomat kuusen, männyn ja koivun oksat ja puunkappaleet. Punnitut tähteet laskettiin takaisin kaulusten sisään. Kaulusten vierestä kerättiin vastaavat hakkuutähdenäytteet kosteuspitoisuuden määrittämistä varten laboratorioissa. Näytteitä säilytettiin jääkaapissa, jonka jälkeen niitä kuivattiin 4–5 vuorokauden ajan ensin 60 asteessa ja sitten loppukuivattiin 105 asteessa. Neulaset irtosivat kuivista näytteistä helposti, jolloin pystyttiin laskemaan oksien ja neulasten osuudet hakkuutähdekaulusten neulasel- lisistä oksista. Näytteiden kosteuspitoisuuden perusteella arvioitiin kauluksiin jätettyjen hakkuutähteiden kuivamassa. Kauluksien hakkuutähdemassaa ei pystytty mittaamaan tar- kasti uudelleen tutkimuksen lopussa, joten kauluskohtaisia kuivamassoja käsiteltiin va- kiona aineiston tilastollisessa analyysissä.

Koeasetelmaan kuului myös hakkuutähdekasojen sekä turpeen lämpötilojen auto- maattinen mittaustila. Jokaiselle mittauspisteelle asetettiin lämpömittari (DS1921G-F5# Thermochron, Maxim Integrated) 5 cm ja 30 cm maanpinnan alapuolelle sekä kaikkien koealueiden 1- ja 2-mittauspisteillä hakkuutähdekasojen sisälle. Kesäisin lämpötiloja mitat- tiin hakkuutähdekasojen sisältä ja 5 cm maanpinnan alapuolelta kahden tunnin välein ja talvisin kolmen tunnin välein. 30 cm maanpinnan alapuolelta lämpötila mitattiin neljän tunnin välein. Hakkuutähde- tai turpeen sisäisen lämpötiladatan puuttuessa tieto on kor- vattu joko saman mittauspisteiden ajallisesti mahdollisimman läheisestä havainnosta, tai pisteen päivittäisen lämpötilan puuttuessa eri koealueiden samojen kauluskäsittelyiden lämpötilojen keskiarvona. Näitä lämpötiloja ei lopulta käytetty tässä tutkimuksessa.

Ideaalikaasun tilayhtälöä varten tarvittava ilman lämpötila mittaushetkellä otettiin varjoisasta paikasta Lettosuon mittauskopin taakse kiinnitetystä lämpömittarista, joka mit- tasi lämpötilat neljän sekunnin välein. Noin viiden minuutin mittaussajalle laskettiin ilman lämpötilojen keskiarvo. Tämän lämpötiladatan puuttuessa tai ollessa selvästi virheellinen (esim. suoran auringonpaahteen takia), ajallisesti lähin tieto noudettiin läheisestä EC- mittaustornista (kuva 2) metrin korkeudessa sijaitsevasta lämpömittarista puolen tunnin tarkkuudella. Jos kumpikin data oli puutteellista, tiedot noudettiin n. 30 kilometrin päästä

ilmatieteen laitoksen Jokioisten mittauspisteen avoimesta datasta 10 minuutin tarkkuudella.

Jokaisella koealalla oli myös vedenpinnan tason mittauspiste (Odyssey Capacitance Water Level Logger, Dataflow systems ltd), joka tallensi vedenpinnan syvyyden automaattisesti kerran tunnissa (kuva 3). Viimeisen mittauskauden lopuksi suoritettiin jokaiselle kauluskäsittelyille ja vedenpinnan syvyysmittarille vaaitus. Mittarin ja kauluskäsittelyn välinen erotus korjattiin aineistoon täsmällisen vedenpinnan syvyyden saamiseksi. Pohjaveden pinnan datan puutteet on korvattu saman koealan ajallisesti lähimmällä tiedolla. Jos mittauspäivän aikana ei ole mitattu vedenpintadataa miltään koealalta, on tiedot jätetty tyhjiksi. Koealalla 2 kahden ensimmäisen mittauspäivän vedenpinnan data puuttui kokonaan, joten data korvattiin toisen, vedenpinnan tasolta ja vaihtelultaan mahdollisimman samankaltaisen koealan datalla.

Ideaalikaasun tilayhtälön eräs muuttuja on mittauksiin käytetyn kammion tilavuus jaettuna pinta-alalla, eli kammion korkeus (suorakulmaisessa kammiossa). Jokaiselle mittauspisteelle mitattiin korkeuskorjaus, eli maanpinnan etäisyys kauluksen ylälaidasta. Korkeuskorjaukset mitattiin molempien mittauskesien aluksi ja toisen mittauskesän lopuksi. Korjauksesta laskettiin yksilöllinen keskiarvo jokaiselle kaulukselle, ja lukema lisättiin kammion korkeuteen mittauspisteellä. Lumiseen aikaan kaulusten uppoumat lumeen mitattiin joka kerta erikseen, ja uppouma vähennettiin kammion korkeudesta.

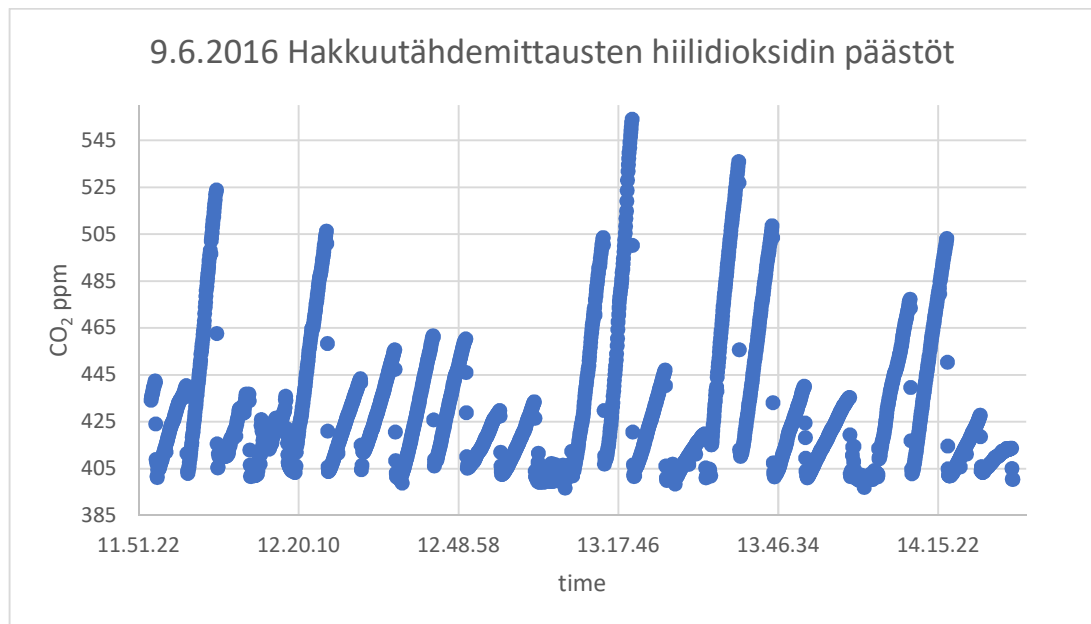
Hakkuutähdekauluskäsittelyille suoritettiin kasvillisuusanalyysi ensimmäisen mittauskesän lopuksi. Eri sammal- ja putkilokasvilajien peittävyudet arvioitiin prosenttiosuuksina kauluksen pohjapinta-alasta. Yksittäiset kasvit merkittiin ylös plusmerkillä.

2.2. Aineiston laskenta ja analyysi

2.2.1. Kasvihuonekaasujen vuot

Hiilidioksidin, metaanin ja typpioksiduulin pitoisuudet tallennettiin jatkuvana päivittäisenä datana Lettosuon maastotietokoneelle, mistä sen pystyi noutamaan etänä. Lokitiedoston merkintöjen avulla hakkuutähdetutkimuksen mittauspäivämäärät ja -ajat pystyttiin eristämään muusta Lettosuon mittausaineistosta. Mittauspäivän ensimmäisen ja viimeisen

kaulusmittauksen välinen hiilidioksididata piirrettiin kuvaajaksi aikaa vasten, josta jokaisen kaulusmittauksen alkamis- ja loppumisajankohta erotettiin silmämääräisesti (kuva 4). Kuvaajasta epätarkasti leikattu mittaus saattoi sisältää kammion paikoilleen asettamisesta johtuvaa kaasun saturaatiota mittauksen alussa, tai kammion poistamisesta johtuvaa pitoisuuksien rajua vähenemistä mittauksen lopussa, jolloin epäselvät pisteet poistettiin ja säilytettiin vain lineaarinen osa mittauksesta. Epäonnistunut kammiomittaus näyttäytyi täysin epälineaarisenä hiilidioksidin käyränä tai aukkoisena pistepilvenä, jolloin mittaus hylättiin. Kaiken kaasudatan erotteluun käytettiin hiilidioksidin pitoisuuksien dataa, sillä hiilidioksidin kaasupitoisuudet reagoivat ennustettavasti ja selkeästi kammion asettamiseen kaulukselle.



Kuva 4: Kauluskohtaisten mittausten erottelemisen päivittäisestä hiilidioksididatasta. Kuvaan on Lettosuon lokin perusteella eroteltu kesäkuun 9. päivän hakkuutähdemittausten alkamis- ja loppumisajankohta. Jokainen hiilidioksidipitoisuuden "piikki" edustaa yhtä kammiomittauksia. Yksittäisen kammiomittauksen data on leikattu päivän datasta erottamalla "piikin" ensimmäinen ja viimeinen datapiste silmämääräisesti.

Jokaisen kaulusmittauksen kaasuille laskettiin vuot kaasun pitoisuusmuutoksen funktiona ajan suhteen (kuva 5). Pitoisuuksista piirrettyyn kuvaajaan sovitettiin regressiosuora. Suoran kulmakertoimen avulla laskettiin kaasuvuo:

$$vuo = \frac{b}{10^6} \times \frac{V}{A} \times \frac{M}{NTP} \times \frac{T_0}{T} \times \frac{P}{P_N} \times \text{yksikkökerroin},$$

missä:

vuo = kasvihuonekaasun vuo maaperästä ilmakehään, g h⁻¹ m⁻²,

b = kasvihuonekaasupitoisuuden muutoksen kulmakerroin, ppm V h⁻¹,

V/A = kammion tilavuus jaettuna pinta-alalla, m,

M = kasvihuonekaasun moolimassa,

- hiilidioksidi 44,01 g mol⁻¹,
- metaani 16,05 g mol⁻¹,
- typpioksiduuli 44,02 g mol⁻¹,

NTP = normaalikaasun tilavuus normaaliolosuhteissa, 22,41 m³ mol⁻¹,

T₀ = normaalilämpötila, 273,15 K,

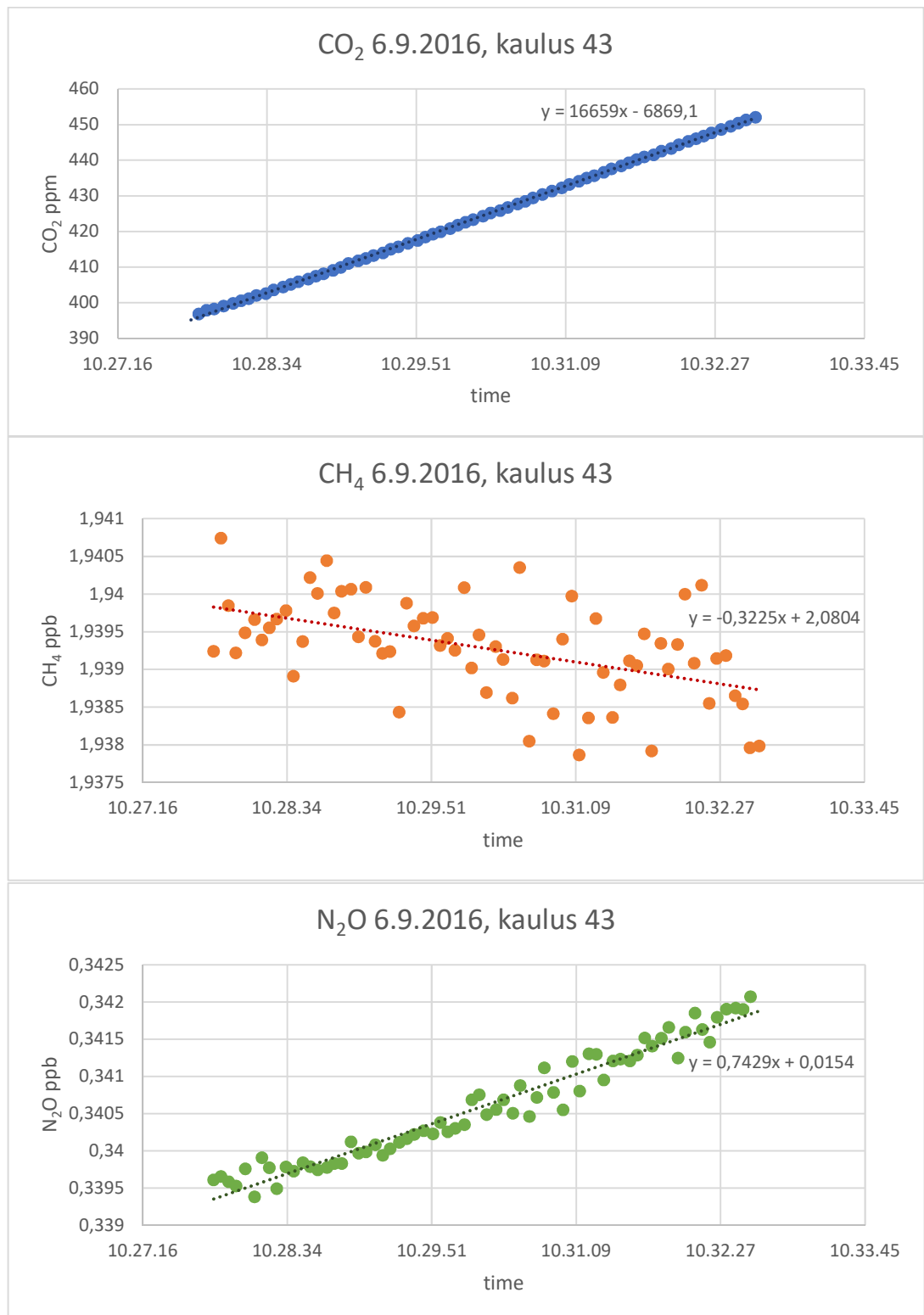
T = ilman lämpötila mittaushetkellä, K,

P = ilmanpaine mittaushetkellä, ei mitattu, oletettiin aina normaali ilmanpaine,

P_N = ilman normaalipaine, 101,325 kPa,

yksikkökerroin = kasvihuonekaasun vuon muuttaminen grammoiksi tai milligrammoiksi.

Laskennoissa käytettiin MS Excel-ohjelmistoa.



Kuva 5: Kaasujen pitoisuuksia aikaa vasten ja niihin sovitettu regressiosuora. Suoran kulmakertoimen avulla laskettiin kaasuvuo kaulukselta. Tässä tapauksessa kaulus on hiilidioksidin ja typpioksiduulin lähde, mutta metaanin nielu.

2.2.2. Aineiston tilastollinen käsittely

Tilastolliseen analyysiin käytettiin R-ohjelmiston versiota 3.6.0 (R Foundation 2019). Tutkimuksen kannalta mielenkiintoisinta oli testata neljän eri kauluskäsittelyn kaasuvuon eroavuuksia sekä hakkuutähdemassan ja sen ositteiden (neulasen oksat) vaikutusta päästöihin. Tutkimuksen nollahypoteesi oli:

- 1) Hakkuutähteiden tähdelaji, määrä tai sijainti metsäkoneen ajouralla ei vaikuta ojitetun suon hiilidioksidi-, metaani- tai typpioksiduulipäästöihin.

Aineiston tilastolliseen käsittelyyn käytettiin R:n lme4-paketin (Bates ym. 2015, versio 1.1-21) lmer-funktiota eli lineaarisesta sekamallista. Kauluskäsittelyjen vaikutusta kaasuvuoihin mallinnettiin lineaarisella sekamallilla, joka oli muotoa:

$$y_{ijk} = \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \varepsilon_{ijk}, \quad (1)$$

missä y_{ijk} on kauluskäsittelyn i ja mittauspäivämäärän j havaintoarvo (kaasuvuo) kaulukselta k , α_i on kauluskäsittelyn i vaikutus, β_j on päivämäärän j satunnaisvaikutus, γ_k on kauluksen k satunnaisvaikutus, ε_{ijk} on virhetermi, ja $i = 1, \dots, 4$, $j = 1, \dots, 37$ ja $k = 1, \dots, 20$. Kauluskäsittelykohtaisia tuloksia testattiin parittaisella testillä R:n emmeans-paketin (Lenth 2015, versio 1.3.5) avulla.

Hakkuutähteiden kuivamassan vaikutusta päästöihin mallinnettiin myös lineaarisella sekamallilla. Kauluskohtaisia tähdemassoja käsiteltiin vakioina, sillä tähteiden kuivamassoja ei pystytty mittaamaan tarkasti tutkimuksen lopuksi. Malli oli muotoa:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_{\text{tähdemassa}} + \beta_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij}, \quad (2)$$

missä y_{ij} on kauluksen i ja päivämäärän j vaste hakkuutähde-, oksa- tai neulasmassan muutokselle, μ on tähdemassan tai sen ositteiden keskiarvo, $\alpha_{\text{tähdemassa}}$ on hakkuutähdemassan

tai sen ositteiden vaikutus, β_i on kauluksen i satunnaisvaikutus, γ_j on päivämäärän j satunnaisvaikutus, ε_{ij} on virhetermi, ja $i = 1, \dots, 20$ ja $j = 1, \dots, 37$. Sekamallin tuloksia verrattiin ANOVA-testillä tyhjää sekamallia vasten, jossa oli mukana vain satunnaismuuttujat.

3 Tulokset

3.1. Hakkuutähteiden massat ja jakaumat

Taulukko 1: Kauluskäsittelyiden hakkuutähteiden tuore- ja kuivamassat, jakauma männyn ja kuusen neulasiin sekä männyn, kuusen ja koivun oksiin. Tummemmat vihreät värit kuvastavat suurempaa tuore- tai kuivamassaa kuin vaaleat vihreät. Sinisten palkkien koko kuvaa hakkuutähdelain kuivamassan osuutta kauluksen kaikista hakkuutähteistä. Koealueiden neljänsiltä kauluksilta poistettiin hakkuutähteet.

kaulus	tuoremassa, kg	kuivamassa, kg	osuudet kuivamassasta (%)					
			mä_neulas	ku_neulas	mä_oks	ku_oks	ko_oks	
11	2.14	0.97	0	27	0	52	21	
12	7.74	3.47	6	15	26	52	1	
13	0.72	0.41	0	39	15	27	19	
21	1.6	0.64	30	7	55	8	0	
22	2.5	1.02	16	0	84	0	0	
23	1.66	1.17	11	0	84	0	5	
31	7.12	2.90	5	8	72	13	2	
32	13.66	5.74	19	1	59	9	12	
33	3.18	2.29	7	4	81	3	4	
41	14.54	5.97	3	14	44	38	0	
42	12.38	4.98	10	16	38	30	6	
43	1.42	0.84	7	23	23	22	24	
51	10.2	4.11	6	6	55	31	2	
52	8.6	3.42	26	0	74	0	0	
53	2.16	1.49	15	0	85	0	0	

Hakkuutähteiden kuivamassa kauluksilla vaihteli 6 kg:n ja 0 kg:n välillä (taulukko 1 Taulukko 1). Suurin osa hakkuutähteistä koostui männyn oksista (taulukko 1). Puulajien neulasit käsittivät keskimäärin 11 % kauluksien kuivamassasta. Kauluksilla 2, jotka sijoitettiin hakkuukoneen renkaan ajamalle uralle, oli keskimäärin eniten hakkuutähteiden kuivamassaa (3,7 kg), kun taas renkaiden väliin jäävillä kauluksilla 1 oli vähemmän (2,9 kg) kuivaa hakkuutähdemassaa. Ajouran sivuun sijoitetut kaulukset 3 sisälsivät keskimäärin 1,2 kg hakkuutähteiden kuivamassaa. Hakkuukoneen ajaja on siis onnistuneesti levittänyt suurimman osan hakkuutähteistä renkaiden painaumiin ajouralla. Kauluskäsittelyiden

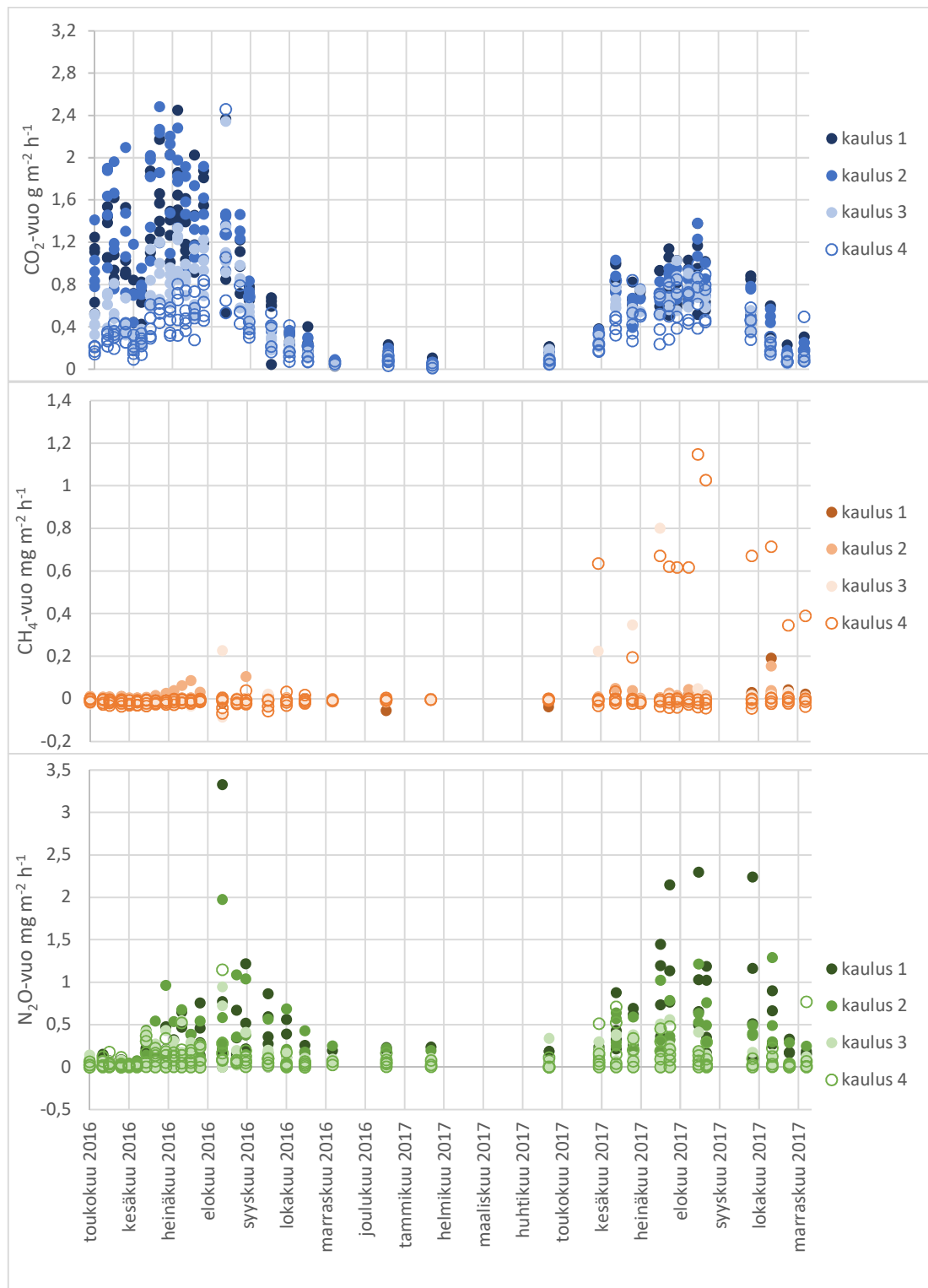
männynoksavaltainen puulajijakauma edustaa hyvin alikasvosuudistuksena suoritettua ylispuumäntyjen hakkuuta. Koeasetelma on siis onnistunut.

3.2. Vuomittausten määrä ja jakaumat sekä ympäristömuuttujat

Taulukko 2: CO₂-, CH₄- ja N₂O-vuomittausten sekä pohjavedenpinnan määrä (N), keskiarvo, maksimi, minimi ja keskihajonta jokaisella kauluskäsittelyllä 1–4. Huomaa, että CO₂-vuo on esitetty grammoina neliömetriltä tunnissa, kun taas CH₄ ja N₂O on esitetty milligrammoina neliömetriltä tunnissa. Tätä taulukkoa käytetään aina jatkossa.

Kauluskäsittely	CO ₂ -vuo, g m ⁻² h ⁻¹	CH ₄ -vuo, mg m ⁻² h ⁻¹	N ₂ O-vuo, mg m ⁻² h ⁻¹	Pohjaveden- pinta, cm
1 N	176	176	164	166
Keskiarvo	0.81	<-0.01	0.30	-28
Maksimi	2.45	0.19	3.33	-9
Minimi	<0.01	-0.06	<-0.01	-54
Keskihajonta	0.52	0.02	0.47	10
2 N	175	175	163	166
Keskiarvo	0.88	0.01	0.20	-23
Maksimi	2.48	0.15	1.97	-7
Minimi	0.02	-0.01	-0.01	-48
Keskihajonta	0.59	0.02	0.30	10
3 N	175	175	163	166
Keskiarvo	0.54	<0.01	0.10	-26
Maksimi	2.34	0.80	0.94	-10
Minimi	0.02	-0.20	<-0.01	-52
Keskihajonta	0.35	0.07	0.15	9
4 N	175	175	163	166
Keskiarvo	0.40	0.03	0.10	-28
Maksimi	2.46	1.15	1.15	-12
Minimi	0.01	-0.07	<-0.01	-50
Keskihajonta	0.29	0.18	0.15	8

Mittauksia suoritettiin 10.5.2016 ja 7.11.2017 välisenä lumettomana aikana. Mittauksia kertyi jokaiselle kasvihuonekaasulle 704 kappaletta, joista hylättiin kaikkiaan 3 kammion tuulettimen epäkunnosta ja siten raakadatan huonosta laadusta johtuen. Typpioksiduulimittauksia jäi lisäksi tallentamatta 48 kappaletta mittauslaitteen toimimattomuuden johdosta. Taulukossa 2 ja kuvassa 6 on esitetty mittausten tulokset.



Kuva 6: Kaikki CO₂, CH₄ ja N₂O vuot kaikkien koealojen kauluksilta 1–4.

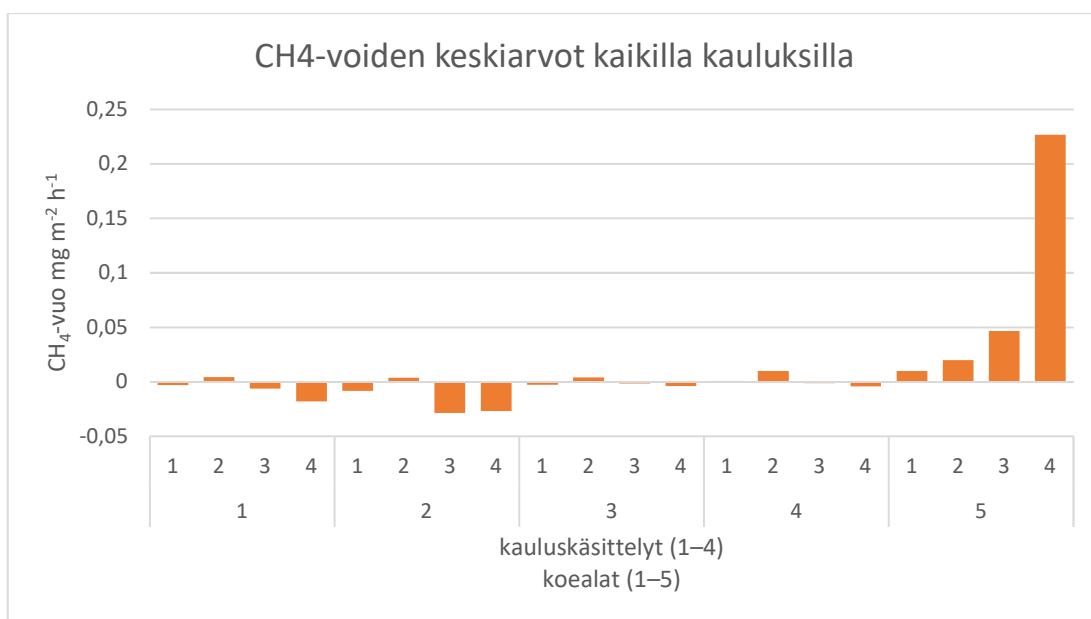
Taulukko 3: Mitattujen ympäristömuuttujien määrä (N), keskiarvo (ka), maksimi (maks), minimi (min) ja keskihajonta (s) vuosilta 2016 ja 2017. Pohjavedenpinnan tunnushuvut on ilmoitettu senttimetreinä maan pinnasta. Ideaalikaasun tilayhtälöä varten laskettiin Lettosuon mittauskopin takaa mitattujen lämpötilojen keskiarvo kaasujen mittaushetkellä.

		Pohjaveden pinta, cm					lämpötila, °C
		koeala 1	koeala 2	koeala 3	koeala 4	koeala 5	
2016	N	5470	5236	5466	5535	5541	404
	ka	-33	-39	-26	-27	-19	16.4
	maks	-16	-28	-13	-15	-8	29.5
	min	-43	-53	-34	-36	-26	-2.2
	s	5.9	4.8	4.6	5.8	2.8	7.2
2017	N	7137	7137	7137	7137	7137	300
	ka	-35	-36	-24	-26	-22	11.9
	maks	-11	-19	-10	-11	-8	23.5
	min	-54	-46	-37	-43	-42	-2.6
	s	9.5	4.0	7.0	8.4	5.9	7.7

Metaanivuon tuloksia tarkastellessa huomattiin poikkeavan suuria kaasuvoita koealueen 5 kauluksilla 3 ja 4 (kuvat 6 ja 8). Poikkeavan suuret metaanivuot johtuivat koealan 5 kasvupaikan märkyydestä (taulukko 3) ja kasvillisuudesta: koealalle oli kesän 2017 aikana kasvanut paljon määrässä turpeessa viihtyvää tupasvillaa, joka tuuletussolukollaan kuljettaa metaania suoraan suon katotelmasta ilmakehään (kuva 7). Kasvukauden 2016 lopussa kaulukselle 4 oli merkitty 5 % peittävyys tupasvillaa. Seuraavan kasvukauden lopussa kasvillisuuskartoitusta ei tehty, mutta koealalta tehdyistä huomioista selviää tupasvillan voimakas kasvu kauluksella 4. Vuoden 2018 syksyllä kaulus 4 on jo täysin tupasvillan peittämä (kuva 7). Kaulusten 1 ja 2 sisälle ei kasvanut tupasvillaa, sillä maa oli täysin hakkuutähteiden peittämä, eikä tähteiden läpi päässyt riittävästi valoa kasvillisuuden kasvamiseksi. Kaulus 3 oli myös lähes tupasvillaton, vaikka hakkuutähteitä olikin vain vähän (kuva 7, taulukko 1). Korkea pohjaveden pinta verrattuna muihin koealoihin sekä määrässä turpeessa kasvavat tupasvillat ovat nostaneet kaikkien koealan 5 kaulusten metaanipäästöjä merkittävästi (taulukko 3, kuva 8). Tässä tutkimuksessa tarkastellaan hakkuutähteiden, ei kasvupaikan märkyyden tai kasvillisuuden, vaikutusta kasvihuonekaasuihin, joten koeala 5 päätettiin analysoida erikseen kuivempien kasvupaikkojen metaanidatasta.

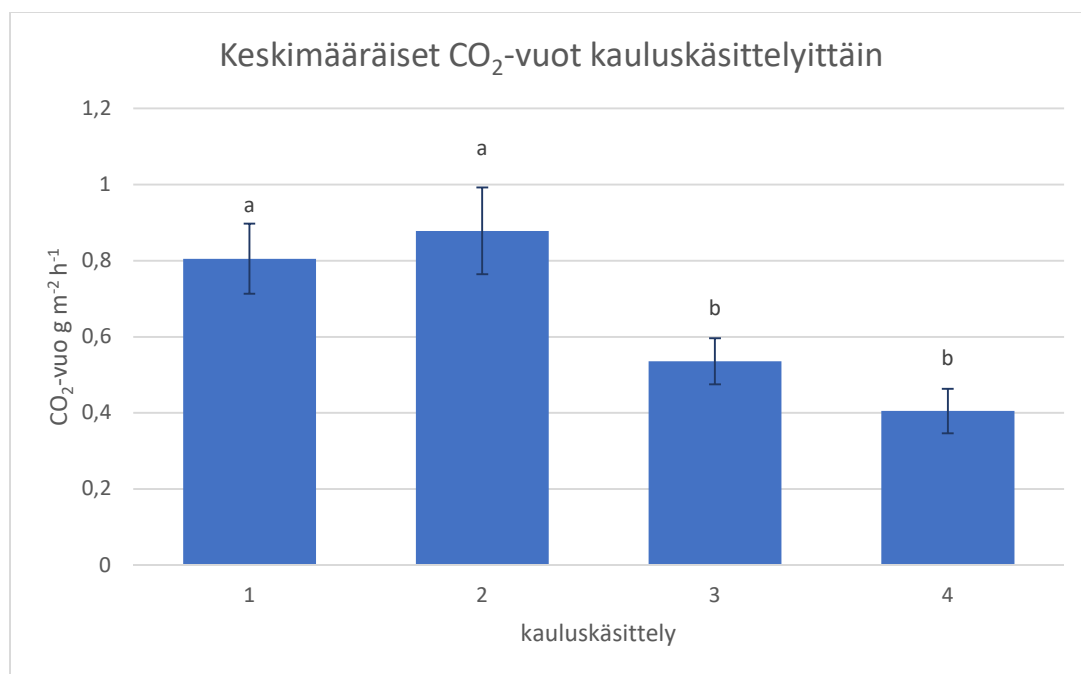


Kuva 7: Koealan 5 kaulukset 3 ja 4 kasvukauden 2018 lopussa. Kaulus 3 kuvassa vasemmalla, tupasvil-
lan peittämästä kauluksesta 4 on näkyvissä vain yksi kulma. Kuva: Kari Minkkinen.



Kuva 8: Koealojen metaanivoiden keskiarvot kauluksittain. Koealat 1-4 olivat tilastollisesti tarkastel-
tuna lähes identtisiä (p -arvot $> 0,98$), kun taas koeala 5 erosi kaikista muista aloista lähes merkitse-
västi tai merkitsevästi (p -arvot $\leq 0,1$). Koeala 5 päätettiin tarkastella erikseen muusta metaanidatasta.

3.3. Hakkuutähteiden vaikutus hiilidioksidivuohon

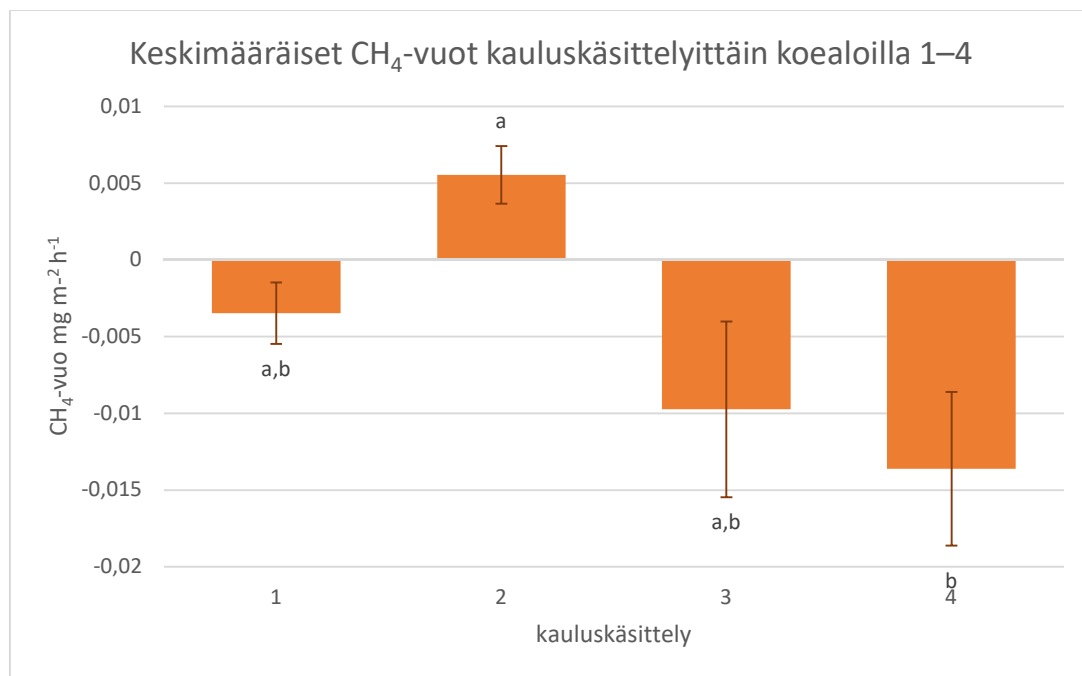


Kuva 9: Keskimääräiset hiilidioksidivuot koealojen kauluskäsittelyiltä 1–4. Virhepalkit ovat sekamallin (1) estimaatti käsittelyn keskivirheelle. Kauluskäsittelyt, jotka eroavat tilastollisesti merkitsevästi toisistaan (sekamallin p -arvo $< 0,05$) on merkitty eri kirjaimilla.

Lineaarisen sekamallin (1) mukaan kauluksilla 1 ja 2, joilla oli paljon hakkuutähteitä, oli myös selvästi enemmän hiilidioksidipäästöjä kuin hakkuutähteettömillä kauluksilla 4 ja vähätähteisillä kauluksilla 3 (kuva 9). Keskimääräiset vuot metsäkoneen rengasurassa sijaitsevilta kauluksilta 2 olivat hieman suuremmat ($0,07 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) kuin ajouran keskellä sijaitsevilta kauluksilla 1, mutta ero ei ole tilastollisesti merkitsevä (p -arvo 0,8). Vähätähteisillä kauluksilla 3 hiilidioksidivuot olivat $0,14 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ korkeammat kuin kauluksilla 4, joilta kaikki hakkuutähteet poistettiin, mutta tämäkään ero ei ole tilastollisesti merkitsevä (p -arvo 0,3).

Lineaarisen sekamallin (2) mukaan hakkuutähteiden kuivamassa vaikutti merkitsevästi ($\chi^2 = 29,86$, p -arvo $< 0,05$) hiilidioksidivuohon. Jokainen lisäkilo hakkuutähteiden kuivamassaa nosti hiilidioksidivuota $0,10 \pm 0,01 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Kun tarkasteltiin kuivaa neulas- ja oksamassaa erikseen, huomattiin neulamassan nostavan hiilidioksidipäästöjä neljä kertaa enemmän ($0,49 \pm 0,06 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) kuin oksamassan ($0,12 \pm 0,02 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

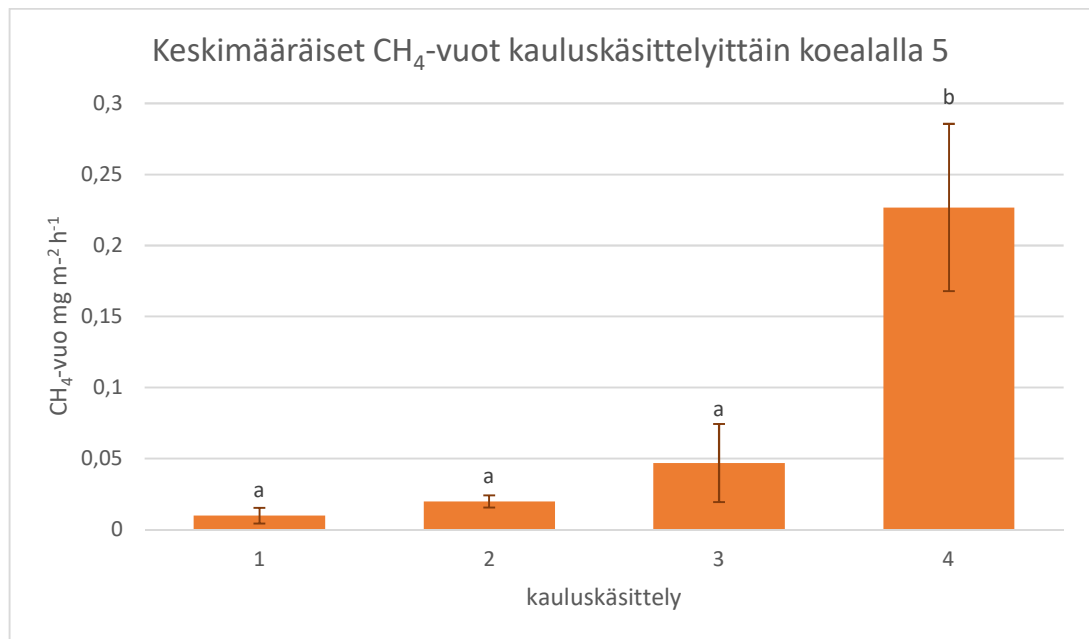
3.4. Hakkuutähteiden vaikutus metaanivuohon



Kuva 10: Keskimääräiset metaanivuot koealojen 1–4 kauluskäsittelyiltä 1–4. Virhepalkit ovat sekamallin (1) estimaatti käsittelyn keskivirheelle. Kauluskäsittelyt, jotka eroavat tilastollisesti merkitsevästi toisistaan (sekamallin p -arvo $< 0,05$) on merkitty eri kirjaimella.

Metaanivuon osalta vain kauluskäsittelyt 2 ja 4 erosivat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (kuva 10). Kauluksilla 2 on ollut eniten hakkuutähteitä (taulukko 1), jotka ovat lisäksi painautuneet tiiviiksi hakkuukoneen renkaiden ajamissa urissa, kun taas kaulus 4 on uran ulkopuolella ja sieltä on aktiivisesti poistettu kaikki hakkuutähteet. Kauluksien 2 metaanivuo on keskimäärin ollut $0,019 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ suurempi kuin kauluksien 4. Kauluksien 2 ja 3 ero on hyvin samankaltainen, $0,015 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, ja p -arvo hyvin lähellä 5 %:n raja-arvoa: 0,066. Käsittelyt 1 ja 2 ovat jo hyvin samankaltaiset (p -arvo 0,39).

Lineaarisen sekamallin (2) mukaan hakkuutähteiden kuivamassa vaikutti merkitsevästi ($\chi^2 = 6.35$, p -arvo = 0.012) metaanivuohon koealoilla 1–4. Yksi kilo kuivaa hakkuutähdettä nosti metaanivuota keskimäärin $0,003 \pm 0,001 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Kilo kuivaa neulasmassaa nosti metaanivuota $0.016 \pm 0.005 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, kun taas oksamassan vaikutus oli neljäsosa neulasmassan vaikutuksesta, $0.004 \pm 0.001 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

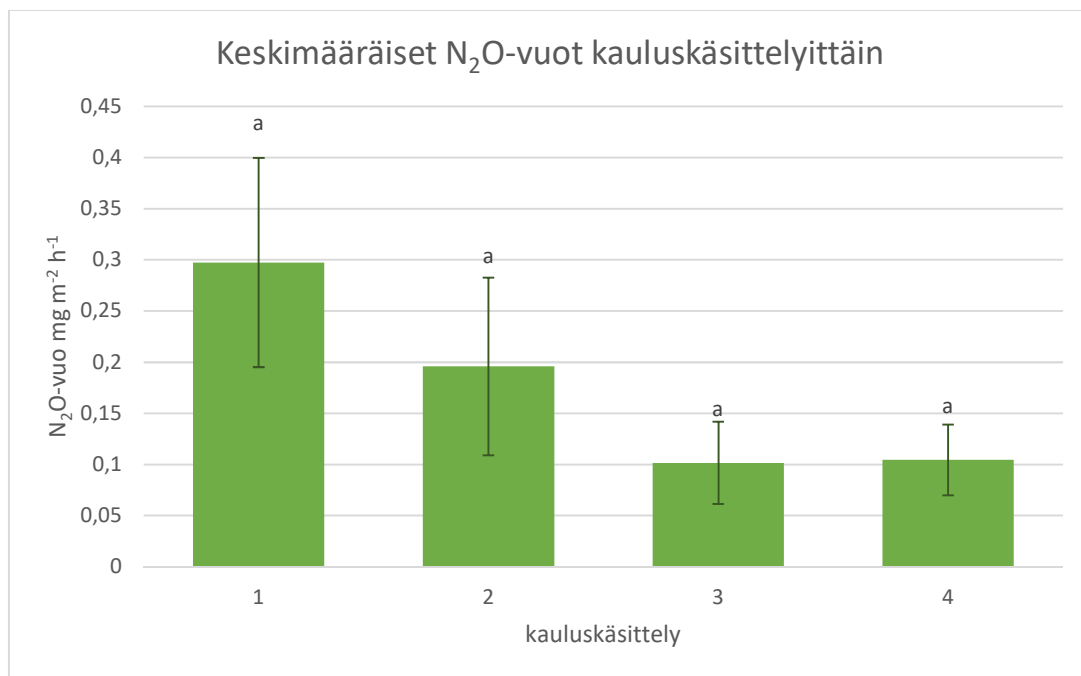


Kuva 11: Keskimääräiset metaanivuot koealan 5 kauluskäsittelyiltä 1–4. Virhepalkit ovat keskivirhe. Kauluskäsittelyt, jotka eroavat tilastollisesti merkitsevästi toisistaan (sekamallin p -arvo $<0,05$) on merkitty eri kirjaimella.

Koealan 5 kauluskäsittelyt poikkeavat huomattavasti muiden koealojen metaanivuon tuloksista (kuva 8). Koealalla 5 kaulus 4 eroaa merkitsevästi muista kauluksista (kuva 11). Kauluksen 4 päästöt ovat $0,22 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ suuremmat kuin pienimpien päästöjen kauluksella 1 ja $0,18 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ suuremmat kuin toiseksi suurimpien päästöjen kauluksella 3 (kuva 11). Koealan 5 kauluksella 4 on $0,33 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ suuremmat päästöt verrattuna muiden koealojen kauluksiin 4, joilta on mitattu suurimmat metaanin nielut (kuvat 10 ja 11).

Koealan 5 metaanipäästöjen vaste hakkuutähteille on päinvastainen muihin koealoihin verrattuna myös sekamallin (2) tuloksien perusteella. Hakkuutähdemassan vaikutus on merkitsevä ($\chi^2 = 6.03$, p -arvo = 0.014), mutta metaanivuo laskee keskimäärin $-0.048 \pm 0.013 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ kuivan hakkuutähdemassan lisääntyessä yhdellä kilolla. Neulas- ja oksamassan erillisiä vaikutuksia ei tarkasteltu.

3.5. Hakkuutähteiden vaikutus typpioksiduulivuohon



Kuva 12: Keskimääräiset typpioksiduulivuot koealojen kauluskäsittelyiltä 1–4. Virhepalkit ovat sekamallin (1) estimaatti käsittelyn keskivirheelle. Kauluskäsittelyt, jotka eroavat tilastollisesti merkitsevästi toisistaan (sekamallin p-arvo <0,05) on merkitty eri kirjaimella. Tässä tapauksessa kaikki kauluskäsittelyt ovat samanlaisia.

Typpioksiduulivuot eivät eroa merkitsevästi toisistaan eri kauluskäsittelyillä. Suurimmat erot ovat kauluskäsittelyjen 1–3 ja 1–4 välillä, joiden p-arvot ovat 0,21 ja 0,22 mainituissa järjestyksessä (kuva 12). Kauluskäsittelyt 3 ja 4 ovat identtiset, ja muut parittaisen testin p-arvot ovat 0,7 luokkaa. Sekamalli (2) vahvistaa tuloksen: kuivalla hakkuutähdemassalla ei ole vaikutusta typpioksiduulivuohon ($\chi^2 = 0.15$, p-arvo = 0.71). Neulas- ja oksamassaa erikseen tarkastelemalla ei saavutettu parempia tuloksia (p-arvot 0,68 ja 0,71).

4 Tulosten tarkastelu

Tämän tutkimuksen tuloksista huomataan, että hakkuutähteillä on vaikutusta ainakin ojitetun suon hiilidioksidi- ja metaanipäästöihin. Tutkimuksen mittauksia suoritettiin vain

lumettomana aikana, mittauspäivinä kello 8 ja 16 välillä, joten tuloksista ei voida vetää johtopäätöksiä vuorokautisista tai vuotuisista keskiarvoista. Tulokset kuitenkin antavat yleiskuvan kasvihuonekaasujen suuruusluokasta ja hakkuutähteiden vaikutuksesta päästöihin.

4.1. Hakkuutähteiden vaikutus hiilidioksidipäästöihin

Hiilidioksidipäästöt hakkuutähteiden peittämällä mittauspisteillä olivat 1,5–2-kertaisia hakkuutähteettömiin ja vähätähteisiin pisteisiin verrattuna (taulukko 2 Taulukko 2, kuvat 6 ja 9). Hakkuutähteiden määrällä on siis vaikutusta hiilidioksidipäästöihin, joten tutkimuksen nollahypoteesi kaatuu. Tulokset ovat linjassa Mäkirannan ym. (2012) tulosten kanssa, joskin kyseisessä tutkimuksessa mitattiin hieman suurempia eroja hakkuutähteellisten ja tähteettömien pisteiden välillä kuin tässä pro gradussa.

Suurimmat päästöt on mitattu kauluskäsittelyiltä 2, jotka oli sijoitettu metsäkoneen renkaan yliajamiin uriin. Näillä mittauspisteillä oli myös keskimäärin eniten hakkuutähdemassaa (taulukko 1). Ero metsäkoneen yliajamien hakkuutähdekasojen ja rengasurien väliin jääneiden hakkuutähdekasojen hiilidioksidipäästöissä ei ollut tilastollisesti merkitsevä (kuva 9), mikä viittaa siihen, ettei tiivistyneellä hakkuutähdemassalla tai turpeella ole merkittävää vaikutusta hiilidioksidipäästöihin. Hakkuutähdekasojen fysikaalisista vaikutuksista kasvihuonekaasupäästöihin tarvitaan lisää tietoja, kuten mainitsee Ojanen ym. (2017).

Neulasmassalla oli neljä kertaa suurempi vaikutus hiilidioksidipäästöihin kuin ok-samassalla tutkimuksen kahden vuoden mittausajanjaksolla. Neulaset sisältävätkin enemmän ravinteita ja maatuvat nopeasti jo ensimmäisten vuosien aikana hakkuiden jälkeen, kun taas puuaines hajoaa hitaammin (esim. Hyvönen ym. 2000, Palviainen ym. 2004, Lindblom 2009). Hakkuutähteiden on todettu lisäävän maaperän typen ja hiilen mineralisaatiota (Adamczyk ym. 2015), mutta myös maaperän ravinnehuuhtoumaa (Wall 2008). Lisäksi neulasista nopeasti hajoava tuore orgaaninen hiili voi kiihdyttää maassa jo olevan vanhan orgaanisen aineen hajoamista voimakkaasti (Kuzyakov ym. 2000, Karhu ym.

2016). Tämän tutkimuksen aikana ei pystytty mittaamaan hakkuutähteiden tai sen ositteiden hajoamisnopeutta, joten tarkkoja johtopäätöksiä hakkuutähteiden vaikutuksesta tähdekan alapuolisen turpeen hajoamisprosesseihin ei voida vetää.

4.2. Hakkuutähteiden vaikutus metaanipäästöihin

Koealoilla 1–4 metaanipäästöt olivat suurimmat metsäkoneen yliajamilla mittauspisteillä 2, jotka olivat myös ainoita metaanin lähteitä (taulukko 2, kuvat 6, 8 ja 10). Näillä kauluskäsittelyillä on ollut keskimäärin eniten hakkuutähteitä (taulukko 1). Hakkuutähteiden määrällä tai kauluksen sijainnilla urassa on siis ollut merkitystä metaanipäästöihin, joten nollahypoteesi ei ole voimassa. 2-mittauspisteet ovat kuitenkin tilastollisesti samanlaiset kauluskäsittelyjen 1 ja 3 kanssa (kuva 10), joissa on ollut vähemmän hakkuutähteitä ja jotka ovat keskimäärin olleet metaanin nieluja. Voidaan siis päätellä, että metsäkoneen yliajolla on ollut voimakkaampi vaikutus metaanipäästöihin kuin hakkuutähteen määrällä. Metsäkoneen painon alla tiivistynyt turve on luonut maahan uran, jossa pohjavedenpinta on lähempänä maan pintaa: mitattu pohjavedenpinta on keskimäärin 2–5 cm korkeammalla kauluskäsittelyillä 2 verrattuna muihin käsittelyihin (taulukko 2). Pohjavedenpinnalla on tunnetusti merkitystä ojitetun suon metaanipäästöihin (Moore ja Knowles 1990, Svensson ja Sundh 1992, Nykänen ym. 1998, Martikainen ym. 1995, Strack ym. 2006, Couwenberg ja Fritz 2012), mutta metsäkoneen mekaanista vaikutusta turpeen ominaisuuksiin ja sen päästöihin ei olla tutkittu. Mäkirannan ym. (2012) tutkimuksessa hakkuutähteillä ei ollut vaikutusta ojitetun suon metaanipäästöihin, mikä antaa lisätukea teorialle siitä, että metaanipäästöt ovat lisääntyneet enemmän metsäkoneen mekaanisen vaikutuksen takia kuin hakkuutähdemassan takia.

Lineaarisen sekamallin (2) mukaan hakkuutähdemassa on kuitenkin kiihdyttänyt metaanipäästöjä koealoilla 1–4. Koealalla 5 korrelaatio on tosin nurinkurinen: metaanipäästöt laskevat hakkuutähdemassan lisääntyessä (kuva 11). On mahdollista, että metaanipäästöihin vaikuttaa voimakkaammin jokin muu muuttuja kuin hakkuutähdemassa, kuten edellä keskusteltu pohjavedenpinta.

Koealalla 5 vain kauluskäsittely 4 erosi merkittävästi muista kauluskäsittelyistä (kuva 11). Aikaisemmin tässä pro gradussa on esitetty, että tulos johtunee koealalle voimakkaasti kasvaneesta tupasvillasta (ks. kappale 3.2.).

4.3. Hakkuutähteiden vaikutus typpioksiduulipäästöihin

Hakkuutähdekauluskäsittelyillä ei ole ollut vaikutusta Lettosuon typpioksiduulipäästöihin (kuva 12). Vähähakkuutähteisillä ja tähteettömillä mittauspisteillä typpioksiduulivuot ovat olleet noin $0,1 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, hakkuutähdekasojen alle jääneillä 2-käsittelyillä noin kaksinkertaiset ja 1-käsittelyillä hieman alle kolminkertaiset (taulukko 2, kuva 12). Tulos on linjassa Mäkirannan ym. (2012) tulosten kanssa, jotka myös mittasivat yli kolminkertaisia typpioksiduulipäästöjä hakkuutähteiden peittämiltä mittauspisteiltä verrattuna paljaisiin mittauspisteisiin. Kauluskäsittelyjen välinen ero ei kuitenkaan ole tilastollisesti merkitsevä tässä pro gradussa (kuva 12). On mahdollista, että N_2O -päästöjen suuri satunnaisvaihtelu mittauspisteiden välillä sekä mittausten liian pieni otanta ovat tehneet tuloksista tilastollisesti merkityksettömiä, vaikka päästöt ovat käytännössä lisääntyneet merkittävästi hakkuutähdemassan myötä.

Tammelan Lettosuo on ravinteikas, sarainen mustikkaturvekangas, jonka kaltaisten turvekankaiden hetkittäiset typpioksiduulipäästöt ovat $0,02\text{--}0,1 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Martikainen ym. 1993, 1995, Regina ym. 1996, 1998). Tässä pro gradussa mitatut vähähakkuutähteisten ja hakkuutähteettömien kauluskäsittelyiden N_2O -vuot ovat olleet näiden tutkimustulosten ylärajoilla. Kenties juuri ennen mittauksia suoritettu harvennushakkuu on nostanut hakkuutähteettömien alueiden typpioksiduulipäästöjä niin, ettei hakkuutähteiden tuoma lisä ole ollut merkitsevä. Harvennushakkuiden vaikutuksesta ojitetun suon typpioksiduulipäästöihin tarvitaan lisää tutkimustietoa.

Päätihakuiden on huomattu lisäävän ravinnerikkaan ojitetun suon N_2O -päästöjä merkittävästi kahden ensimmäisen kesän ajan hakkuiden jälkeen (Huttunen ym. 2003). On myös todettu, että suurin osa hakkuutähteiden tyyppistä sijaitsee neulasissa, jotka hajoavat nopeasti ensimmäisten hakkuunjälkeisten vuosien aikana (Hyvönen ym. 2000). Hakkuutähteiden ja niiden sisältämien ravinteiden lisäksi ojitetun suon typpioksiduulipäästöihin vaikuttaa maanmuokkaus. Pearsonin ym. (2012) kaksivuotisen tutkimuksen mukaan

niukkaravinteisilla, paksuturpeisilla turvekankailla maanmuokkauksella oli merkitsevä vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin sekä muokatuilla että muokkaamattomilla pinnoilla. Vielä julkaisemattomassa tutkimuksessa ravinteikkaalta Tammelan Lettosuolta on arvioitu, ettei vuoden 2016 harvennuksilla ole ollut vaikutusta typpioksiduulipäästöihin, mutta tehty päätehakkuu on nostanut päästöjä merkitsevästi (Korkiakoski ym. 2018).

4.4. Tulosten luotettavuus

Suljetun kammion menetelmään (Alm ym. 2007) liittyy useita virhelähteitä. Menetelmä yleisesti aliarvioi mittaustuloksia, mikä johtuu maaperän ilmatilan vaikutuksesta kammion sisäiseen ilmatilaan (Rayment 2000). Aliarviointi pyritään minimoimaan kammion kalibroinnilla, mutta kalibrointi on hankala suorittaa hiukkaskooltaan ja kosteudeltaan heterogeeniselle maaperälle kuten turpeelle (Alm ym. 2007). Joka tapauksessa kammion koko ja siihen asennettava tuuletin tulee kalibroida sopiviksi, jotta mittaustulokset eivät vääristy.

Kammiomittaukset vaativat kammioon sopivien kauluksien asettamisen maahan kiinteästi. Toimenpidettä varten tässä tutkimuksessa on moottorisahalla katkottu hakkuutähteet ja sahattu 15 cm maanpinnan alapuolelle kauluksen ääriivivoja pitkin. Maanpinnan alapuolelle sahaaminen on katkonut puiden ja kasvien juuria, mikä on synnyttänyt kuollutta ja kuolevaa juurimassaa kammion sisälle, luoden erilaiset auto- ja heterotrofisen hengityksen olosuhteet kuin kauluksen ulkopuolella.

Kaulusten sisälle jääneiden hakkuutähteiden kuivapaino määriteltiin tutkimuksen alussa kaulusten vierellä olevien näytteiden kuivapainon perusteella. Hakkuutähteiden todellinen kuivapaino on siis voinut erota näytteiden tuloksista. Kaulusten hakkuutähteiden massa mitattiin myös tutkimuksen lopussa, mutta tulokset olivat ristiriitaisia: tähdemassa oli saattanut pudota reilusti, vain vähän, pysyä samana tai jopa kasvaa ensimmäisestä kahden vuoden takaisesta mittauksesta. Tutkimuksen alussa mitattua hakkuutähdemassaa ei fyysisesti erotettu tai merkitty erilleen kauluksilla jo olevasta hakkuutähdemassasta, joten tutkimuksen lopussa oli vaikea erottaa alun perin mitatut tähteet hakkuista edeltävistä tähteistä ja hakkuiden jälkeen kauluksille pudonneista tähteistä. Tutkimuksen lopussa tehty mittausta päätettiin hylätä. Hakkuutähteiden kuivamassan vähenemistä hajoamisprosessien

takia ei siis pystytty mallintamaan tutkimuksen ajaksi, vaan tähteiden massaa käsiteltiin vakiona tulosten laskennassa ja analysoinnissa, mikä ei vastaa todellisuutta.

5 Johtopäätökset

Metsäkoneen ajouralle kasatut hakkuutähteet lisäävät ojitetun suon hiilidioksidipäästöjä yhtä lailla metsäkoneen renkaiden painamissa urissa kuin renkaiden väliin jäävällä alueella. Metsäkoneen mekaanisella vaikutuksella turpeeseen ei tunnu olevan vaikutusta hiilidioksidipäästöihin, vaan päästöt lisääntyvät nimenomaan hakkuutähdemassan mukana. Hakkuutähteiden ositteista neulasilla oli suurempi vaikutus hiilidioksidipäästöihin kuin puuaineksella. Ajouran hakkuutähteillä on merkitystä metaanipäästöihin, mutta ei ole varmaa johtuuko lisääntynyt metaanivuo metsäkoneen renkaiden turpeeseen painamista urista ja siten pohjavedenpinnan läheisyydestä vai itse hakkuutähteistä. Koealalle 5 kasvaneet tupasvillat ovat kiihdyttäneet koealan metaanipäästöjä merkittävästi. Typpioksiduulipäästöt lisääntyivät kaksin–kolminkertaisiksi hakkuutähteiden peittämällä mittauspisteillä, mutta tuloksella ei ollut tilastollista merkitystä mittauspisteiden välisen suuren satunnaisvaihtelun ja liian pienen otannan myötä. Tulos on ristiriidassa Mäkirannan ym. (2012) samankaltaisen tutkimuksen kanssa, mutta tämä tutkimus suoritettiin päätehakkuiden yhteydessä. Tammelan Lettosuolta saadun alustavan tutkimuksen mukaan typpioksiduulipäästöt lisääntyvät merkitsevästi päätehakkuualueella, mutta eivät yläharvennusalueella (Korkiakoski ym. 2018, vielä julkaisematon tutkimus).

Tämän pro gradun perusteella ei voida päätellä miten paljon hakkuutähteillä oli vaikutusta niiden alapuolella olevan turpeen hajoamisprosesseihin. Hakkuutähteet ja metsäkoneen mekaaninen vaikutus turpeeseen kuitenkin lisäävät hiilidioksi- ja metaanipäästöjä ravinteikkailla ojitetuilla soilla voimakkaan harvennuksen yhteydessä. Typpioksiduulipäästöt kaksin- tai kolminkertaistuivat hakkuutähdemassan lisääntyessä, mutta tulos ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Käytännön toimentasuosituksia ei voine antaa näiden tietojen perusteella, vaan lisätietoa on hankittava niin hakkuutähteiden vaikutuksesta turpeen hajoamisprosesseihin, metsäkoneen mekaanisesta vaikutuksesta turpeeseen, kuin valitun hakkuutavan vaikutuksesta ojitetun suon kasvihuonekaasupäästöihin.

Kiitokset

Haluan kiittää ohjaajiani yliopistonlehtori Kari Minkkistä ja tutkija Paavo Ojasta, jotka ehdottivat minulle tätä aihetta, ja antoivat erinomaista apua ja neuvontaa koko kirjoittamisprosessin ajan. Kiitos kärsivällisyydestä prosessin venyessä kaksi- ja puolivuotiseksi taipaleeksi luottamustehtävien ja -reissujen, ulkomaanharjoittelun, kenttäkurssin ja työn-
teon ohella.

Kiitos rakkaalle Erikille, jonka puoleen saatoin aina nojata, kun tarvitsin tukea.

Kiitos perheelleni ja ystävilleni tuesta ja huveista kaikkien opiskeluvuosieni ajan.

Lähteet

- Achat, D.L., Deleuze, C., Landmann, G., Pousse, N., Ranger, J., Augusto, L. 2015. Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth – a meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 348: 124–141.
- Adamczyk, B., Adamczyk, S., Kukkola, M., Tamminen, P., Smolander, A. 2015. Logging residue harvest may decrease enzymatic activity of boreal forest soils. *Soil Biology & Biochemistry* 82: 74–80.
- Adamczyk, S., Kitunen, V., Lindroos, A.-J., Adamczyk, B., Smolander, A. 2016. Soil carbon and nitrogen cycling processes and composition of terpenes five years after clear-cutting a Norway spruce stand: effects of logging residues. *Forest Ecology and Management* 381: 318–326.
- Alm, J., Shurpali, N. J., Tuittila E.-S., Laurila, T., Maljanen, M., Saarnio, S. & Minkkinen, K. 2007. Methods for determining emission factors for the use of peat and peatlands – flux measurements and modelling. *Boreal Environment Research* 12: 85–100.
- Anttila, P., Nivala M., Laitila J., Flyktman M., Salminen O. & Nivala J. 2014. Metsähakkeen alueellinen korjuupotentiaali ja käyttö vuonna 2020. Metlan työraportteja 313: 55 s. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp313.pdf>
- Augustin, J., Merbach, W. & Rogasik, J. 1998. Factors influencing nitrous oxide and methane emissions from minerotrophic fens in northeast Germany. *Biology & Fertility of Soils* 28: 1–4.
- Bartlett, K. B. & Harriss, R. C. 1993. Review and assessment of methane emissions from wetlands. *Chemosphere* 26: 261–320.

- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B. & Walker, S. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48.
doi:10.18637/jss.v067.i01.
- Bubier, J. L. 1995. The relationship of vegetation to methane emission and hydrochemical gradients in northern peatlands. *Journal of Ecology* 83(3): 403–420.
- Chapuis-Lardy, L., Wrage, N., Metay, A., Chotte, J.-L. & Bernoux, M. 2007. Soils, a sink for N₂O? A review. *Global Change Biology* 13: 1–17.
- Couwenberg, J. & Fritz, C. 2012. Towards developing IPCC methane ‘emission factors’ for peatlands (organic soils). *Mires and Peat* 10: Article 03, 1–17.
- Curzon, M., D’Amato, A. & Palik, B. 2014. Harvest residue removal and soil compaction impact forest productivity and recovery: potential implications for bioenergy harvests. *Forest Ecology and Management* 329: 99–107.
- Gorham, E. 1991. Northern peatlands – role in the carbon-cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications* 1: 182–195.
- Gustavsson, L., Haus, S., Ortiz, C. A., Sathe, R. & Le Truong, N. 2015. Climate effects of bioenergy from forest residues in comparison to fossil energy. *Applied Energy* 138: 36–50.
- Helmisaari, H.-S., Kaarakka, L. & Olsson, B. 2014. Increased utilization of different tree parts for energy purposes in the Nordic countries. *Scandinavian Journal of Forest Research* 29(4): 312–322.
- Holub, S., Terry, T., Harrington, C., Harrison, R. & Meade, R. 2013. Tree growth ten years after residual biomass removal, soil compaction, tillage, and competing vegetation

control in a highly-productive Douglas-fir plantation. *Forest Ecology and Management* 305: 60–66.

Huttunen, J.T., Nykänen, H., Martikainen, P.J. & Nieminen, M. 2003. Fluxes of nitrous oxide and methane from drained peatlands following forest clear-felling in southern Finland. *Plant and Soil* 255: 457.

Hyvönen, R., Olsson, B. A., Lundkvist, H. & Staaf, H. 2000. Decomposition and nutrient release from *Picea abies* (L.) Karst. and *Pinus sylvestris* L. logging residues. *Forest Ecology and Management* 126: 97–112.

IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 s.

Kaila A., Asam Z., Sarkkola S., Xiao L. Laurén A., Vasander H. & Nieminen M. 2012. Decomposition of harvest residue needles on peatlands drained for forestry — implications for nutrient and heavy metal dynamics. *Forest Ecology and Management* 277: 141–149.

Kansallinen metsästrategia 2025 - Valtioneuvoston periaatepäätös 12.2.2015. 2015. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 6/2015. Maa- ja metsätalousministeriö, Helsinki. 54 s.

Karhu, K., Hilasvuori, E., Fritze, H., Biasi, C., Nykänen, H., Liski, J., Vanhala, P., Heinonsalo, J. & Pumpanen, J. 2016. Priming effect increases with depth in a boreal forest soil. *Soil Biology & Biochemistry* 99: 104–107.

Karlsson, H., Börjesson, P., Hansson, P.-A. & Ahlgren, S. 2014. Ethanol production in biorefineries using lignocellulosic feedstock – GHG performance, energy balance and

implications of life cycle calculation methodology. *Journal of Cleaner Production* 83: 420–427.

Kauppi P.E., Posch M., Hänninen P., Henttonen H.M., Ihalainen A., Lappalainen E., Starr M. & Tamminen P. 1997. Carbon reservoirs in peatlands and forests in the boreal regions of Finland. *Silva Fennica* 31: 13–25.

Kekkonen, H., Ojanen, H., Haakana, M., Latukka, A. & Regina, K. 2019. Mapping of cultivated organic soils for targeting greenhouse gas mitigation. *Carbon Management* 10(2): 115–126. <https://doi.org/10.1080/17583004.2018.1557990>

Kettunen, A. 2003. Connecting methane fluxes to vegetation cover and water table fluctuations at microsite level: A modeling study. *Global Biogeochemical Cycles* 17(2): 1051.

King J. Y., Reeburgh W. S. & Regli S. K. 1998. Methane emission and transport by arctic sedges in Alaska: results of a vegetation removal experiment. *Journal of Geophysical Research* 103: 29029–29083.

Kirkinen, J., Palosuo, T., Holmgren, K. & Savolainen, I. 2008. Greenhouse impact due to the use of combustible fuels: Life cycle viewpoint and relative radiative forcing commitment. *Environmental Management* 42: 458–469.

Klemedtsson, L., von Arnold, K., Weslien, P. & Gundersen, P. 2005. Soil CN ratio as a scalar parameter to predict nitrous oxide emissions. *Global Change Biology* 11: 1142–1147.

Korkiakoski, M., Ojanen, P., Minkkinen, K., Penttilä, T., Rainne, J., Laurila, T. & Lohila, A. The effect of partial harvesting and clearcutting on CO₂, CH₄ and N₂O balances in a drained peatland forest. 20th EGU General Assembly, EGU2018, Proceedings from the conference held 4-13 April, 2018 in Vienna, Austria, p.12014.

Kuzyakov, Y., Friedel, J. & Stahr, K. 2000. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biology & Biochemistry* 32: 1485–1498.

Laiho, R. 1996. Changes in understorey biomass and species composition after water level drawdown on pine mires in southern Finland. *Suo* 47: 59–69.

Laiho, R. & Laine, J. 1997. Tree stand biomass and carbon content in an age sequence of drained pine mires in southern Finland. *Forest Ecology and Management* 93: 161–169.

Laiho, R., Vasander, H., Penttilä, T. & Laine, J. 2003. Dynamics of plant-mediated organic matter and nutrient cycling following long-term water-level drawdown in boreal peatlands. *Global Biogeochemical Cycles* 17(2):1053. DOI 10.1029/2002GB002015

Laine, J. & Vanha-Majamaa, I. 1992. Vegetation ecology along a trophic gradient on drained pine mires in southern Finland. *Annales Botanici Fennici* 29: 213–233.

Laine, J., & Vasander, H. 1998. Suo ekosysteeminä. Julkaisussa: Vasander, H. (toim.). Suomen suot. Suoseura ry, Helsinki. s. 10–19.

Laine, J., Silvola, J., Tolonen, K., Alm, J., Nykänen, H., Vasander, H., Sallantausta, T., Savolainen, I., Sinisalo, J. & Martikainen, P. J. 1996. Effect of water level drawdown in northern peatlands on the global climatic warming. *Ambio* 25: 179–184.

Laine, J., Laiho, R., Minkkinen, K. & Vasander, H. 2006. Forestry and peatland ecosystems. Teoksessa: Wieder, R.K. & Vitt, D.H. (ed.). *Boreal peatland ecosystems. Ecological studies* 188. Springer-Verlag, Heidelberg. s. 331–357.

Lenth, R. 2019. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.3.5. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>

Limpens, J., Heijmans, M. M. P. D. & Berendse, F. 2006. The Nitrogen Cycle in Boreal Peatlands. Julkaisussa: Wieder R.K., Vitt D.H. (ed.) Boreal Peatland Ecosystems. Ecological Studies (Analysis and Synthesis), vol 188. Springer, Berlin, Heidelberg. s. 195–230. https://doi.org/10.1007/978-3-540-31913-9_10

Lindblom, H. 2009. Nutrient release from heaps of logging residues in a thinned Scots pine stand. Master's thesis. Faculty of Agriculture and Forestry - Department of Forest Ecology. 66 s.

Lindholm, E.-L., Stendahl, J., Berg, S. & Hansson, P.-A. 2011. Greenhouse gas balance of harvesting stumps and logging residues for energy in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26: 586–594.

Lohila, A., Aurela, M., Hatakka, J., Pihlatie, M., Minkkinen, K., Penttilä, T. & Laurila, T. 2010a. Responses of N₂O fluxes to temperature, water table and N deposition in a northern boreal fen. *European Journal of Soil Science* 61: 651–661.

Lohila, A., Minkkinen, K., Laine, J., Savolainen, I., Tuovinen, J.-P., Korhonen, L., Laurila, T., Tietäväinen, H. & Laaksonen, A. 2010b. Forestation of boreal peatlands: Impacts of changing albedo and greenhouse gas fluxes on radiative forcing. *Journal of geophysical research* 115: G04011. doi.org/10.1029/2010JG001327

Lohila, A., Minkkinen, K., Aurela, M., Tuovinen, J.-P., Penttilä, T., Ojanen, P. & Laurila, T. 2011. Greenhouse gas flux measurements in a forestry-drained peatland indicate a large carbon sink. *Biogeosciences* 8: 3203–3218.

Martikainen, P.J., Nykänen, H., Crill, P. & Silvola, J. 1993. Effect of a lowered water table on nitrous oxide fluxes from northern peatlands. *Nature* 366: 51–53.

Martikainen, P. J., Nykänen, H., Alm, J., & Silvola, J. 1995. Change in fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide due to forest drainage of mire sites of different trophic. *Plant Soil* 168: 571–577.

Metsätilastollinen vuosikirja 2014. 2014. Metsäntutkimuslaitos. Tammerprint Oy. 416 s.

Minkkinen, K. 1999. Effect of forestry drainage on the carbon balance and radiative forcing of peatlands in Finland. Ph.D. thesis. Department of Forest Ecology, University of Helsinki.

Minkkinen, K. & Laine, J. 1998a. Effect of forest drainage on the peat bulk density of pine peatlands in Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 178–186.

Minkkinen, K. & Laine, J. 1998b. Long-term effect of forest drainage on the peat carbon stores of pine mires in Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 1267–1275.

Minkkinen, K., Vasander, H., Jauhiainen, S., Karsisto, M. & Laine J. 1999. Post-drainage changes in vegetation composition and carbon balance in Lakkasuo mire, Central Finland. *Plant and Soil* 207: 107–120.

Minkkinen K, Laine J & Hökkä H. 2001. Tree stand development and carbon sequestration in drained peatland stands in Finland – a simulation study. *Silva Fennica* 35: 55–69.

Minkkinen K., Korhonen R, Savolainen I. & Laine J. 2002. Carbon balance and radiative forcing of Finnish peatlands 1900–2100 — the impact of forestry drainage. *Global Change Biol.* 8: 785–799.

Minkkinen, K., Laine, J., Shurpali, N. J., Mäkiranta P., Alm, J. & Penttilä, T. 2007a. Heterotrophic soil respiration in forestry-drained peatlands. *Boreal Environment Research* 12(2): 115–126.

Minkkinen, K., Penttilä, T. & Laine, J. 2007b. Tree stand volume as a scalar for methane fluxes in forestry-drained peatlands in Finland. *Boreal Environmental Research* 12: 127–132.

Minkkinen, K., Byrne, K. A. & Trettin, C. 2008. Climate impacts of peatland forestry. *Julkaisussa: Strack, M. (ed.). Peatlands and Climate Change. International Peat Society, Saarijärvi, Finland. s. 98–122.*

Montanarella, L., Jones, R. J. A. & Hiederer, R. 2006. The distribution of peatland in Europe. *Mires Peat* 1: 1–10.

Moore, T. R. & Knowles, R. 1990. Methane emissions from fen, bog and swamp peatlands in Quebec. *Biogeochemistry* 11: 45–61.

Mäkipää, R., Linkosalo, T., Komarov, A. & Mäkelä, A. 2014. Mitigation of climate change with biomass harvesting in Norway spruce stands: are harvesting practices carbon neutral? *Canadian Journal of Forest Research* 45: 217–225.

Mäkiranta, P., Riutta, T., Penttilä, T. & Minkkinen, K. 2010. Dynamics of net ecosystem CO₂ exchange and heterotrophic soil respiration following clearfelling in a drained peatland forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 1585–1596.

Mäkiranta, P., Laiho, R., Penttilä, T. & Minkkinen, K. 2012. The impact of logging residue on soil GHG fluxes in a drained peatland forest. *Soil Biology & Biochemistry* 48: 1–9.

Nieminen, M. 1998. Changes in nitrogen cycling following the clearcutting of drained peatland forests in southern Finland. *Boreal Environmental Research* 3: 9–21.

Nieminen, M., Hökkä, H., Laiho, R., Juutinen, A., Ahtikoski, A., Pearson, M., Kojola, S., Sarkkola, S., Launiainen, S., Valkonen, S., Penttilä, T., Lohila, A., Saarinen, M.,

Hahti, K., Mäkipää, R., Miettinen, J. & Ollikainen, M. 2018. Could continuous cover forestry be an economically and environmentally feasible management option on drained boreal peatlands? *Forest Ecology and Management* 424: 78–84.

Nykänen, H., Alm, J., Silvola, J., Tolonen, K. & Martikainen, P.J. 1998. Methane fluxes on boreal peatlands of different fertility and the effect of long-term experimental lowering of the water table on flux rates. *Global Biogeochemical Cycles* 12: 53–69.

Ojanen, P., Minkkinen, K., Alm, J. & Penttilä, T. 2010. Soil-atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands, *Forest Ecology and Management* 260: 411–421.

Ojanen, P., Minkkinen, K. & Penttilä, T. 2013. The current greenhouse gas impact of forestry-drained boreal peatlands. *Forest Ecology and Management* 289: 201–208.

Ojanen, P., Mäkiranta, P., Penttilä, T. & Minkkinen, K. 2017. Do logging residue piles trigger extra decomposition of soil organic matter? *Forest Ecology and Management* 405: 367–380.

Olajuyigbe, S., Tobin, B. & Nieuwenhuis, M. 2014. The role of brash in augmenting forest site carbon capital and maintaining site nutrition in a Sitka spruce forest in Ireland. *European Journal of Forest Research* 133: 563–572.

Paavilainen, E. & Päivänen, J. 1995. *Peatland forestry – ecology and principles*. Springer, Berlin. 248 s.

Palviainen M., Finér L., Kurka A.M., Mannerkoski H., Piirainen S. & Starr M. 2004. Decomposition and nutrient release from logging residues after clear-cutting of mixed boreal forest. *Plant and Soil* 263: 53–67.

Pearson, M., Saarinen, M., Minkkinen, K., Silvan, N. & Laine, J. 2012. Short-term impacts of soil preparation on greenhouse gas fluxes: A case study in nutrient-poor, clear-cut peatland forest. *Forest Ecology and Management* 283: 10–26.

Puun energiakäyttö. 2017. [Verkkodokumentti]. Luonnonvarakeskus. Saatavissa: <https://stat.luke.fi/puun-energiakaytto>. [Viitattu 6.3.2019].

Päivänen, J. 2007. Suot ja suometsät – järkevän käytön perusteet. Metsäkustannus Oy, 319 s.

R foundation. 2019. R version 3.6.0 (2019-04-26) -- "Planting of a Tree". Copyright (C) 2019 The R Foundation for Statistical Computing Platform: i386-w64-mingw32/i386 (32-bit).

Rayment, M. B. 2000. Closed chamber systems underestimate soil CO₂ efflux. *European Journal of Soil Science* 51(1): 107–110. doi:10.1046/j.1365-2389.2000.00283.x

Regina, K., Nykänen, H., Silvola, J. & Martikainen, P. J. 1996. Fluxes of nitrous oxide from boreal peatlands as affected by peatland type, water table level and nitrification capacity. *Biogeochemistry* 35: 401–418.

Regina, K., Nykänen, H., Maljanen, M., Silvola, J., Martikainen, P., 1998. Emissions of N₂O and NO and net nitrogen mineralization in a boreal forested peatland treated with different nitrogen compounds. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 132–140.

Repo, A., Känkänen, R., Tuovinen, J.-P., Antikainen, R., Tuomi, M., Vanhala, P. & Liski, J. 2011. Forest bioenergy climate impact can be improved by allocating forest residue removal. *Global Change Biology Bioenergy* 4: 202–212.

- Roberts, S. D., Harrington, C. A. & Terry, T. A. 2005. Harvest residue and competing vegetation affect soil moisture, soil temperature, N availability, and Douglas-fir seedling growth. *Forest Ecology and Management* 205: 333-350.
- Saarnio, S., Monreo, M., Shurpali, N. J., Tuittila, E-S., Mäkilä, M. & Alm, J. 2007. Annual CO₂ and CH₄ fluxes on pristine boreal mires as a background for the lifecycle analysis of peat energy. *Boreal environment research* 12: 101–113.
- Shannon, R. D., White, J. R., Lawson, J. E. & Gilmour, B. S. 1996. Methane efflux from emergent vegetation in peatlands. *Journal of Ecology* 84: 239–246.
- Silvola, J. 1988. Effect of drainage and fertilization on carbon output and nutrient mineralization of peat. *Suo* 39: 27–37.
- Silvola, J., Alm, J., Ahlholm, U., Nykänen, H. & Martikainen P.J. 1996. CO₂ fluxes from peat in boreal mires under varying temperature and moisture condition. *Journal of Ecology* 84: 219–228.
- Starr, M. 1982. The development of drained peatland forest sites in Finland. Ph. D. Thesis. Department of Geography, Faculty of Pure Science, University of Sheffield. 311 s.
- Strack, M., Waller, M. F. & Waddington, J. M. 2006. Sedge Succession and Peatland Methane Dynamics: A Potential Feedback to Climate Change. *Ecosystems* 9: 278–287. DOI: 10.1007/S10021-005-0070-1.
- Strack, M. 2008. Peatlands and Climate Change. International Peat Society, Jyväskylä. 224 s. ISBN 978-952-99401-1-0.
- Ström, L., Ekberg, A., Mastepanov, M. & Christensen, TR. 2003. The effect of vascular plants on carbon turnover and methane emissions from a tundra wetland. *Global Change Biology* 9: 1185–1192

Suomen virallinen tilasto (SVT). 2019. Kasvihuonekaasut: Maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous, Ennakko 2017. [Verkkodokumentti]. Tilastokeskus, Helsinki. ISSN=1797-6049. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/khki/2017/01/khki_2017_01_2019-01-15_tie_001_fi.html. [Viitattu 14.3.2019].

Svensson, B.H. & Sundh, I. 1992. Factors affecting methane production in peat soils. *Suo* 43: 183–190.

The Global Methane Budget 2000-2012. 2016. [Verkkodokumentti]. Earth System Science Data. Saatavissa: www.globalcarbonproject.org/methanebudget. [Viitattu 29.1.2019].

Turunen, J. 2008. Development of Finnish peatland area and carbon storage 1950–2000. *Boreal Environment Research* 13: 319–334.

Turunen, J., Tomppo, E., Tolonen, K. & Reinikainen, A. 2002. Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland – application to boreal and subarctic regions. *The Holocene* 12: 79–90.

Wall, A. 2008. Effect of removal of logging residue on nutrient leaching and nutrient pools in the soil after clearcutting in a Norway spruce stand. *Forest Ecology and Management* 256: 1372–1383.

Wall, A. & Hytönen, J. 2011. The long-term effects of logging residue removal on forest floor nutrient capital, foliar chemistry and growth of a Norway spruce stand. *Biomass Bioenergy* 35: 3328–3334.

Wei, X., Liu, W., Waterhouse, J. & Armlede, M. 2000 Simulations on impacts of different management strategies on long-term site productivity in lodgepole pine forests of the central interior of British Columbia. *Forest Ecology and Management* 133: 217–229.

UNFCCC 1997. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 11.12.1997. United Nations Office. Geneva, Switzerland.